



**José Miguel Gião Beja Ventura**

Licenciado em Engenharia das Energias Renováveis

## **Estudo Experimental de um Sistema BIPV/T-PCM**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Energias Renováveis – Conversão Eléctrica e Utilização Sustentável

Orientador: Doutora Laura Elena Aelenei, LNEG  
Co-orientador: Prof. Doutor João Murta Pina, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Anabela Gonçalves Pronto  
Arguente: Prof. Doutor António Luiz Moura Joyce  
Vogais: Doutora Laura Elena Aelenei



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2014**



**José Miguel Gião Beja Ventura**

Licenciado em Engenharia das Energias Renováveis

## **Estudo Experimental de um Sistema BIPV/T-PCM**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Energias Renováveis – Conversão Eléctrica e Utilização Sustentável

Orientador: Doutora Laura Aelenei, LNEG

Co-orientador: Prof. Doutor João Murta Pina, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Anabela Gonçalves Pronto

Arguente: Prof. Doutor António Luiz Moura Joyce

Vogais: Doutora Laura Elena Aelenei



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2014**



'Copyright' José Miguel Gião Beja Ventura, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de divulgá-la através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Agradecimentos**

Agradeço à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pela bolsa de investigação que me concedeu no âmbito do projecto FCOMP-01-0124-FEDER-019471 (Ref: PTDC/AURAQI-AQI/117782/2010).

Agradeço à minha orientadora Laura Aelenei, pela oportunidade de estar integrado neste projecto, e pelo tempo dispensado.

Gostaria de agradecer também ao meu co-orientador Professor João Murta Pina pela colaboração.

Um agradecimento ao António Rocha e Silva pela sua pronta colaboração neste trabalho.

Agradeço aos meus colegas Ana Ferreira e Ricardo Pereira, e ao Carlos Rodrigues, pela ajuda que me deram nas várias fases do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Paulo Canhoto, um grande obrigado por todo o tempo que dispensou para me ajudar.

Um obrigado muito especial à Beatriz Alves, por ter passado de Professora a Engenheira, e ter discutido comigo as problemáticas que surgiram.

Por fim, gostaria de deixar um obrigado muito especial à minha mãe, ao meu pai, e à minha irmã pelo apoio prestado, e que se mostrou essencial.





## Resumo

A União Europeia tem dado cada vez mais enfoque à eficiência energética nos edifícios e à sua capacidade de produção de energia, tendo lançado a directiva “Energy Performance of Buildings Directive” com o intuito de que até 31 de Dezembro de 2018 todos os edifícios novos sejam “nZEB-nearly Zero Energy Building”, o que significa que devem por um lado diminuir o seu consumo energético, aumentando a sua eficiência, e por outro lado produzir localmente e através de fontes de energias renováveis toda, ou quase toda, a energia de que necessitam.

A presente tese está integrada no Projecto “Frame – Prefabricated systems (modules) for low-energy buildings: design, prototyping and testing” (Ref: PTDC/AURAQI-AQI/117782/2010) que está a ser desenvolvido na Unidade de Eficiência Energética do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG).

Neste trabalho é desenvolvido e analisado um sistema BIPV/T-PCM (Building Integrated Photovoltaic Thermal – Phase Change Materials) que engloba todo um novo conceito de captação, armazenamento e gestão da energia solar em fachadas. Este sistema é composto por um módulo fotovoltaico, uma bateria de PCM (Materiais de Mudança de Fase) e todo um sistema de fluxo de ar que permite a gestão da energia colectada e armazenada. Foi também desenvolvido teoricamente um código de gestão energética para a manipulação do sistema.

O sistema em estudo apoia-se em três objectivos principais: aquecer no inverno; arrefecer no verão; e aumentar a eficiência do PV arrefecendo-o.

Na sequência do trabalho realizado verificou-se que o conceito do sistema em estudo alcança alguns dos objectivos propostos, tendo ainda potencial para se continuar o seu desenvolvimento.

O sistema em estudo é um sistema inovador, e como tal está a ser registada uma patente com base no conceito desenvolvido.

### **Palavras-Chave:**

BIPV/T, Materiais de Mudança de Fase, Fachadas Solares, Energia Solar



## Abstract

The European Union has given increasingly focus on energy efficiency in buildings and their ability to produce energy. The Energy Performance of Buildings Directive, created by the European Union, stands that by December 31, 2018 all new buildings must be nearly zero-energy buildings (NZEB), which means that they must firstly reduce the energy consumption by increasing their efficiency, and on the other hand produce all, or nearly all, the required energy by renewable energy sources.

This thesis is integrated in the project “*Frame - Prefabricated systems (modules) for low-energy buildings: design, prototyping and testing*”, that is being developed at the *Unidade de Eficiência Energética – UEE – (Energy Efficiency Unit)* from Laboratório Nacional de Energia e Geologia – LNEG – (National Laboratory of Energy and Geology) from Portugal.

In this work is developed and analyzed a BIPV/T-PCM system that includes an entire new concept of captation, storage of and distribution of solar energy in facades. This system is composed by a PV module, a battery of PCM (Phase Change Material) and a system of air flow that allows the distribution of collected and stored energy. It was also theoretically developed a code of energy distribution for manipulation of the system.

The system under study is based on three main objectives: warm in winter; cool in summer; and increase the efficiency of the PV cooling it.

In the sequence of this work it was found that the system operates well for some of the proposed objectives, and further has the potential to be continued its development.

The system under study is an innovating system, and as such is being registered a patent based on the concept developed.

### Key Terms:

BIPV/T, Phase Change Materials, Solar Facades, Solar Energy



# Índice

<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Preâmbulo .....	1
1.2 Estado da arte .....	1
1.2.1 Fachadas solares .....	2
1.2.2 BIPV/T-PCM .....	7
1.2.3 Materiais de mudança de fase – PCM .....	7
<b>2. Descrição do Sistema BIPV/T-PCM .....</b>	<b>9</b>
2.1 Considerações gerais .....	9
2.2 Descrição do sistema .....	10
2.2.1 Módulo fotovoltaico .....	11
2.2.2 Cavidade de ar .....	12
2.2.3 Bateria térmica de PCM .....	13
2.2.4 Ventiladores .....	16
2.2.5 Comportas e gavetas .....	17
2.2.6 Equivalente eléctrico .....	18
2.3 Princípio de funcionamento .....	19
2.3.1 Modo 1 – Carregamento do PCM a partir do PV (Inverno) .....	21
2.3.2 Modo 2 – Aquecimento da sala a partir do PV (Inverno) .....	21
2.3.3 Modo 3 – Aquecimento da sala a partir do PCM (Inverno) .....	22
2.3.4 Modo 4 – Aquecimento da sala a partir do PV e do PCM (Inverno) .....	23
2.3.5 Modo 5 – Descarregamento do PCM para o exterior (Verão) .....	23
2.3.6 Modo 6 – Carregamento do PCM a partir da sala + Ventilação do PV com o exterior (Verão) .....	24
2.3.7 Modo 7 – Inactivo Inverno .....	25
2.3.8 Modo 8 – Ventilação do PV com o exterior (Verão) .....	25
2.3.9 Modo 9 – Inactivo Verão .....	26
<b>3. Equipamentos e Processos de Cálculo .....</b>	<b>27</b>
3.1 Equipamentos e medidas .....	27
3.1.1 Irradiância .....	27
3.1.2 Fluxo convectivo de calor .....	28
3.1.3 Corrente e tensão .....	29
3.1.4 Temperatura .....	29
3.1.5 Mapa de sensores .....	31
3.2 Processos de cálculo de transferência de calor e electricidade .....	34
3.2.1 Irradiância .....	34

3.2.2	Módulo fotovoltaico.....	34
3.2.3	Ventiladores.....	34
3.2.4	Calor transmitido por fluxo condutivo e convectivo .....	35
3.2.5	Calor transmitido por ventilação .....	35
3.2.6	Cálculo integral das potências.....	36
3.2.7	Calor armazenado no PCM .....	37
3.2.8	Cálculo da potência da bateria de PCM .....	40
<b>4.</b>	<b>Análise Experimental BIPV/T – PCM .....</b>	<b>41</b>
4.1	Introdução e descrição da análise.....	41
4.2	Período de ensaio e descrição das condições climáticas .....	42
4.3	Balanco energético do sistema .....	44
4.4	Resultados experimentais de Inverno .....	46
4.4.1	Modo 2 – Aquecimento da sala a partir do PV .....	46
4.4.2	Modo 1 – Carregamento do PCM a partir do PV .....	52
4.4.3	Modo 3 – Aquecimento da sala a partir do PCM.....	60
4.4.4	Análise energética – Inverno .....	64
4.5	Resultados experimentais de Verão .....	66
4.5.1	Modo 5 – Descarregamento do PCM para o exterior.....	67
4.5.2	Modo 8, Modo 9 e BIPV-T .....	70
4.5.3	Análise energética – Verão .....	78
4.6	Análise de balanço energético térmico de aplicação do sistema a uma sala.....	80
<b>5.</b>	<b>Gestão e Optimização do Sistema.....</b>	<b>83</b>
5.1	Gestão energética do sistema.....	83
5.2	Código lógico de optimização da gestão energética.....	86
5.3	Automatização .....	91
5.3.1	Actuadores.....	92
5.3.2	Outros componentes .....	95
5.3.3	Montagem.....	99
<b>6.</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>101</b>
6.1	Considerações finais .....	101
6.2	Trabalho futuro .....	103
	<b>Bibliografia.....</b>	<b>105</b>
	<b>Anexo I.....</b>	<b>107</b>
	<b>Anexo II.....</b>	<b>123</b>

# Índice de Figuras

Figura 1.1 – Diagrama de subdivisão das fachadas solares [1] .....	2
Figura 1.2 – Building Integrated Solar Thermal [1] .....	3
Figura 1.3 – Building Integrated Solar Thermal, Universidade de Tecnologia do Chipre .....	3
Figura 1.4 – Building Integrated Photovoltaic [1] .....	4
Figura 1.5 – Integração de células fotovoltaicas em telhas [7] .....	4
Figura 1.6 – Edifício Solar XXI.....	5
Figura 1.7 – Paredes de Armazenamento Térmico [1] .....	6
Figura 1.8 – Energia poupada em função da área de Trombe wall [10] .....	6
Figura 1.9 – Diagrama de subdivisão das fachadas solares, incluindo o BIPV/T-PCM .....	7
Figura 1.10 – Tipos de materiais de mudança de fase existentes [15].....	8
Figura 2.1 – Variações térmicas e temperatura de conforto .....	9
Figura 2.2 – Translaccção de energia térmica.....	10
Figura 2.3 – Descrição dos componentes do sistema .....	11
Figura 2.4 – Parte frontal do sistema, módulo fotovoltaico .....	11
Figura 2.5 – Inversor .....	12
Figura 2.6 – Cavidade de ar .....	13
Figura 2.7 – Bateria térmica, placas paralelas .....	13
Figura 2.8 – Bateria térmica, componente removível .....	14
Figura 2.9 – Curva Q-T, Diagrama de mudança de fase .....	14
Figura 2.10 – Curva Q-T, Temperatura do PCM em função do calor armazenado [17].....	15
Figura 2.11 – Ventiladores da bateria térmica .....	16
Figura 2.12 – Actuadores do sistema, parte interior .....	17
Figura 2.13 – Actuadores do sistema, parte exterior .....	18
Figura 2.14 – Equivalente eléctrico .....	18
Figura 2.15 – Modo de funcionamento 1.....	21
Figura 2.16 – Modo de funcionamento 2.....	21
Figura 2.17 – Modo de funcionamento 3.....	22
Figura 2.18 – Modo de funcionamento 4.....	23
Figura 2.19 – Modo de funcionamento 5.....	23
Figura 2.20 – Modo de funcionamento 6.....	24
Figura 2.21 – Modo de funcionamento 7.....	25
Figura 2.22 – Modo de funcionamento 8.....	25
Figura 2.23 – Modo de funcionamento 9.....	26
Figura 3.1 - Piranómetro.....	27
Figura 3.2 – Sombreamento no módulo fotovoltaico .....	28
Figura 3.3 – Fluxímetros.....	28
Figura 3.4 – Shunt .....	29
Figura 3.5 – Cablagem utilizada nos sensores de temperatura.....	30
Figura 3.6 – Sensores de temperatura da cavidade de ar .....	30
Figura 3.7 – Sensor de temperatura à saída da bateria térmica.....	31
Figura 3.8 – Sensores de temperatura no PCM.....	31
Figura 3.9 – Mapa de sensores.....	32
Figura 3.10 – Método de Simpson [20] .....	36
Figura 3.11 – Curva T-Q.....	37
Figura 3.12 – Subdivisão da curva T-Q.....	37
Figura 3.13 – 1ª parte da curva T-Q.....	38
Figura 3.14 – 2ª parte da curva T-Q.....	38
Figura 3.15 – 3ª parte da curva T-Q.....	39
Figura 3.16 – 4ª parte da curva T-Q.....	39

Figura 3.17 – Exemplo do calculador de energia armazenada no PCM .....	40
Figura 4.1 – Diagrama representativo dos regimes previstos para teste .....	41
Figura 4.2 – Temperatura média diária do ambiente exterior no período de inverno .....	42
Figura 4.3 – Irradiância média diária no período de Inverno .....	42
Figura 4.4 – Temperatura média diária do ambiente exterior no período de verão.....	43
Figura 4.5 – Irradiância média diária no período de verão .....	43
Figura 4.6 – Irradiância solar, dia 10 de Julho .....	44
Figura 4.7 – Balanço energético do sistema .....	44
Figura 4.8 – Temperaturas, Modo 2.....	46
Figura 4.9 – Esquema gráfico de temperaturas, Modo 2.....	47
Figura 4.10 – Balanço energético, Modo 2 .....	48
Figura 4.11 – Eficiências, Modo 2 .....	49
Figura 4.12 – Eficiência global em função de $(T_{in} - T_a/GD)$ , Modo 2.....	50
Figura 4.13 – Eficiência de permuta de calor no PV, Modo 2.....	51
Figura 4.14 – Temperaturas, Modo 1.....	52
Figura 4.15 – Esquema gráfico de temperaturas, Modo 1 .....	53
Figura 4.16 – Temperaturas 2, Modo 1 .....	54
Figura 4.17 – Balanço energético, Modo 1 .....	55
Figura 4.18 – Eficiências, Modo 1 .....	56
Figura 4.19 – Eficiência em função de $(TPCM - T_a)/GD$ , Modo 1.....	57
Figura 4.20 – Eficiências de permuta de calor, Modo 1 .....	58
Figura 4.21 – Temperaturas, Modo 3.....	60
Figura 4.22 – Temperaturas 2, Modo 3.....	60
Figura 4.23 – Esquema gráfico de temperaturas, Modo 3.....	61
Figura 4.24 – Potência útil ( $Q_{V_{sala}}$ ) e potência fornecida ( $Q_{PCM}$ ), Modo 3 .....	62
Figura 4.25 – Balanço energético, Modo 3 .....	63
Figura 4.26 – Balanço energético, Inverno .....	64
Figura 4.27 – Esquema gráfico de temperaturas, dia 10, Modo 5.....	68
Figura 4.28 – Esquema gráfico de temperaturas, dia 11, Modo 5.....	68
Figura 4.29 – Temperatura do PCM dia 10 e 11, Modo 5.....	69
Figura 4.30 – Eficiência de extracção de calor, Modo 5 .....	70
Figura 4.31 – Balanço energético, Verão.....	71
Figura 4.32 – Eficiência, Modo 9, Modo 8, e BIPV/T .....	71
Figura 4.33 – Eficiências Térmica e Eléctrica, Modo 9 .....	72
Figura 4.34 – Eficiências Térmica e Eléctrica, Modo 8 .....	73
Figura 4.35 – Temperatura do PV, Modo 8 e 9.....	73
Figura 4.36 – Temperatura do PV em função de $(T_a/GD)$ , Modo 9 e 8 .....	74
Figura 4.37 – Fluxo de calor para a sala em função de $(T_a - T_s)/GD$ , Modo 8, Modo 9 e BIPV/T ....	75
Figura 4.38 – Esquema gráfico de temperaturas, Modo 9 (Inactivo).....	75
Figura 4.39 – Esquema gráfico de temperaturas, Modo 8 (Ventilação do PV).....	76
Figura 4.40 – Fluxo de calor do PV para a cavidade de ar em função de $(T_a - T_s)/GD$ .....	77
Figura 4.41 – Fluxo para o interior da sala, Regime 4, Regime 5 e BIPV/T .....	77
Figura 5.1 – Temperaturas , Modo 1 .....	83
Figura 5.2 – Modo 1, Funcionamento ineficiente .....	84
Figura 5.3 – Modo 2, Funcionamento ineficiente .....	84
Figura 5.4 – Modo 5, Funcionamento ineficiente .....	85
Figura 5.5 – Sensores de temperatura que fundamentam a gestão energética.....	86
Figura 5.6 – Subrotina Estação.....	87
Figura 5.7 – Escala das estações do ano .....	87
Figura 5.8 – Programa de gestão energética.....	89
Figura 5.9 – Actuadores do sistema, parte interior .....	91
Figura 5.10 – Actuadores do sistema, parte exterior .....	92



Figura 5.11 – Motor de passo, Motor de passo em b), Motor de passo em a).....	93
Figura 5.12 – Servomotor.....	93
Figura 5.13 – Servomotores acoplados a rodas que abrem/fecham as gavetas da bateria térmica....	94
Figura 5.14 – Relé.....	94
Figura 5.15 – Arduino Mega 2560 R3.....	95
Figura 5.16 – Big easy driver.....	96
Figura 5.17 – Transformador AC/DC 5V 3A.....	96
Figura 5.18 – Transformador AC/DC 12V 5A.....	97
Figura 5.19 – Breadboard.....	97
Figura 5.20 – Sensor DS18B20 .....	98
Figura 5.21 – Montagem dos componentes de automatização .....	99
Figura 5.22 – Esquema eléctrico da automatização .....	100
Figura II.0.1 – Informação técnica do PCM.....	124
Figura II.0.2 – Informação técnica do inversor .....	125
Figura II.0.3 – Informação técnica do PV .....	126
Figura II.0.4 – Informação técnica dos ventiladores .....	127

## Índice de Tabelas

Quadro 2.1 – Legenda da figura Figura 2.14 .....	19
Quadro 2.2 – Estado dos actuadores em função dos modos de funcionamento .....	20
Quadro 3.1 – Constantes de calibração dos fluxímetros .....	29
Quadro 3.2 – Legenda do mapa de sensores.....	33
Quadro 3.3 – Potência dos ventiladores .....	34
Quadro 3.4 – Caudal nos Modos de funcionamento 2 e 3.....	36
Quadro 4.1 – Legenda do balanço energético .....	45
Quadro 4.2 – Calendário de experimentação de inverno .....	46
Quadro 4.3 – Valores energéticos, Modo 2.....	51
Quadro 4.4 – Valores energéticos, Modo 1.....	59
Quadro 4.5 – Valores energéticos, Modo 3.....	63
Quadro 4.6 – Valores energéticos, Inverno.....	65
Quadro 4.7 – Calendarização de experimentação de verão.....	67
Quadro 4.8 – Valores energéticos, Regime de Verão 2 .....	78
Quadro 4.9 – Valores energéticos, Regime de Verão 3 .....	78
Quadro 4.10 – Valores energéticos, BIPV/T .....	79
Quadro 5.1 – Legenda das figuras Figura 5.6 e Figura 5.8 .....	88
Quadro 5.2 – Características técnicas, Motor passo-a-passo .....	93
Quadro 5.3 – Características técnicas, Servomotor .....	93
Quadro 5.4 – Características técnicas, Relé.....	94
Quadro 5.5 – Características técnicas, Arduino Mega 2560 R3.....	95
Quadro 5.6 – Características técnicas, Big easy driver .....	96
Quadro 5.7 – Características técnicas, Transformador AC/DC 5V 3A .....	96
Quadro 5.8 – Características técnicas, Transformador AC/DC 12V 5A .....	97
Quadro 5.9 – Características técnicas, Breadboard .....	97
Quadro 5.10 – Características técnicas, Fusível.....	98
Quadro 5.11 – Características técnicas, Sensor de temperatura DS18B20.....	98



# Nomenclatura

## SIGLAS

AC – Alternating Current

BIPV – Building Integrated Photovoltaic

BIPV/T – Building Integrated Photovoltaic Thermal

BIPV/T - PCM – Building Integrated Photovoltaic Thermal – Phase change Materials

BIST – Building Integrated Solar Thermal

DC – Direct Current

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

NREL – National Renewable Energy Laboratory

nZEB – nearly Zero Energy Building

PCM – Phase Change Materials

PV – Módulo Fotovoltaico

## NOTAÇÕES

$A_{\text{Isolamento}}$  – Área do isolamento entre a bateria e a sala [ $\text{m}^2$ ]

$A_{PV}$  – Área do PV [ $\text{m}^2$ ]

$A_T$  – Área total frontal do sistema [ $\text{m}^2$ ]

$C_p$  – Capacidade térmica mássica [ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ]

$\dot{F}_{Batsala}$  – Potência medida no fluxímetro da bateria [W]

$\dot{F}_{PV}$  – Potência medida no fluxímetro do PV [W]

$\dot{G}_D$  – Irradiância normal incidente na parte frontal do sistema [W]

$G_D$  – Irradiação normal incidente na parte frontal do sistema [kJ]

$\dot{G}_{D\,PV}$  – Irradiância normal incidente no PV [W]

$G_{D\,PV}$  – Irradiação normal incidente no PV [kJ]

$\dot{m}$  – Caudal mássico [kg/s]

$G_{PerdasExterior}$  – Potência perdida para o exterior [W]

$G_{PerdasEstrutura}$  – Potência perdida para a parede [W]

$P_{PV}$  – Energia produzida pelo PV [kJ]

$\dot{P}_{PV}$  – Potência produzida pelo PV [W]

$P_{Ventiladores}$  – Energia consumida pelos ventiladores [kJ]

$\dot{P}_{Ventiladores}$  – Potência consumida pelos ventiladores [W]

$Q$  – Energia sob a forma de calor [kJ]

$\dot{Q}_{Ar}$  – Potência absorvida pelo ar da cavidade de ar [W]

$\dot{Q}_{ArBat}$  – Potência sob a forma de calor transmitida entre da cavidade de ar e a bateria térmica [W]

$Q_{BatSala}$  – Energia sob a forma de calor transmitida entre a bateria térmica e a sala [kJ]

$\dot{Q}_{BatSala}$  – Potência sob a forma de calor transmitida entre a bateria térmica e a sala [W]

$Q_{PCM(t=5)}$  – Energia armazenada no PCM no instante 5 minutos [kJ]

$Q_{PCM(t=0)}$  – Energia armazenada no PCM no instante zero [kJ]

$Q_{PCM}$  – Energia absorvida pelo PCM [kJ]

$\dot{Q}_{PCM}$  – Potência absorvida pelo PCM [W]

$\dot{Q}_{PV}$  – Potência absorvida pelo PV [W]

$Q_{VSala}$  – Energia sob a forma de calor transmitida por ventilação de ou para a sala [kJ]

$\dot{Q}_{PVAr}$  – Potência sob a forma de calor transmitida entre o PV e a cavidade de ar [W]

$\dot{Q}_V$  – Potência sob a forma de calor transmitida por ventilação [W]

$\dot{Q}_{VAr}$  – Potência sob a forma de calor transmitida por ventilação de ou para a cavidade de ar [W]

$\dot{Q}_{VExt}$  – Potência sob a forma de calor transmitida por ventilação para o exterior [W]

$\dot{Q}_{VSala}$  – Potência sob a forma de calor transmitida por ventilação de ou para a sala [W]

$T$  – Temperatura [°C]

$T_a$  – Temperatura ambiente [°C]

$T_{Ar1}$  – Temperatura 1 da cavidade de ar [°C]

$T_{Ar2}$  – Temperatura 2 da cavidade de ar [°C]

$T_{Ar3}$  – Temperatura 3 da cavidade de ar [°C]

$T_{Ar4}$  – Temperatura 4 da cavidade de ar [°C]

$T_{Ar5}$  – Temperatura 5 da cavidade de ar [°C]

$T_{Bateria\ Inferior}$  - Temperatura na parte exterior inferior da bateria [°C]

$T_{Bateria\ Superior}$  - Temperatura na parte exterior superior da bateria [°C]

$T_{in}$  – Temperatura de entrada do ar no sistema [°C]

$T_{PCM1}$  – Temperatura 1 do PCM [°C]

$T_{PCM2}$  – Temperatura 2 do PCM [°C]

$T_{PCM3}$  – Temperatura 3 do PCM [°C]

$T_{PV1}$  – Temperatura 1 do PV [°C]

$T_{PV2}$  – Temperatura 2 do PV [°C]

$T_{PV3}$  – Temperatura 3 do PV [°C]

$T_{PV4}$  – Temperatura 4 do PV [°C]

$T_{PCMMédia}$  – Temperatura média dos sensores do PCM [°C]

$T_{PVMédia}$  – Temperatura média dos sensores do PV [°C]

$T_s$  – Temperatura da sala [°C]

$\Delta t$  – Intervalo de tempo [s]

$\eta_{T1}$  – Eficiência térmica do modo 1

$\eta_{T2}$  – Eficiência térmica do modo 2

$\eta_{T3}$  – Eficiência térmica do modo 3

$\eta_{T5}$  – Eficiência térmica do modo 5



# 1. Introdução

## 1.1 Preâmbulo

A presente tese está integrada no Projecto “Frame – Prefabricated systems (modules) for low-energy buildings: design, prototyping and testing”, FCOMP-01-0124-FEDER-019471 (Ref: PTDC/AURAQI-AQI/117782/2010), que está a ser desenvolvido na Unidade de Eficiência Energética do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), e que foi financiado pelo programa FEDER s - COMPETE através da fundação para Ciência e Tecnologia (FCT).

Este projecto iniciou-se em Março de 2012, contando com um primeiro protótipo construído e testado na fase inicial do projecto, e com um segundo protótipo que foi construído e analisado no decorrer desta tese e que acaba por ser não só um resultado da optimização do primeiro protótipo, mas também o desenvolvimento de um novo conceito de captação, armazenamento e gestão da energia solar em fachadas.

Este sistema é um BIPV/T-PCM, composto por um módulo fotovoltaico, uma bateria de PCM (Materiais de Mudança de Fase) e todo um sistema de fluxo de ar que permite a gestão da energia colectada e armazenada.

O princípio deste sistema apoia-se em três objectivos principais: aquecer no inverno; arrefecer no verão; e aumentar a eficiência do PV arrefecendo-o.

O sistema em estudo é um sistema inovador, e como tal está a ser registada uma patente com base no conceito desenvolvido.

## 1.2 Estado da arte

Na antiguidade o ser humano já tirava partido do sol como uma fonte de energia para as suas habitações. Está reportado que para Sócrates a casa ideal deveria “ ser virada a sul, onde o sol durante o inverno passa por baixo das varandas, mas durante o verão, quando o sol se move na direcção das nossas cabeças, o telhado proporciona uma sombra agradável” [1].

Nessa altura a adopção de soluções solares provinha da inexistência do vasto leque de soluções de aquecimento/arrefecimento que existem nos dias de hoje. Embora ao longo dos tempos as soluções solares não tenham sido abandonadas, hoje em dia, a necessidade ressurgue por várias razões: pela escassez a curto ou médio prazo dos combustíveis fósseis; pela crescente noção da importância de um planeta limpo; e ainda por razões económicas, que podem estar ou não relacionados com as razões referidas anteriormente.

Estas razões têm levado a União Europeia a adoptar medidas de produção de energia descentralizada, ou seja, localizada nos pontos de consumo, tendo sido lançada a “Energy Performance of Buildings Directive” com o intuito de que até 31 de Dezembro de 2018 todos os edifícios novos sejam “nZEB-nearly Zero Energy Building”, o que significa que devem por um lado diminuir o seu consumo energético, aumentando a sua eficiência, e por outro lado produzir localmente e através de fontes de energias renováveis toda, ou quase toda, a energia de que necessitam [2].

Este facto leva inevitavelmente a humanidade de novo à adopção das fachadas solares, por necessidade, de forma a conseguir soluções para as problemáticas que surgem.



### 1.2.1 Fachadas solares

Desde há várias décadas que se vêm desenvolvendo diversas tecnologias de fachadas solares, com as mais variadas abordagens. Guillermo et al [1] fez um apanhado do desenvolvimento das fachadas solares ao longo dos anos, efectuando uma organização das mesmas segundo o esquema ilustrado na Figura 1.1.

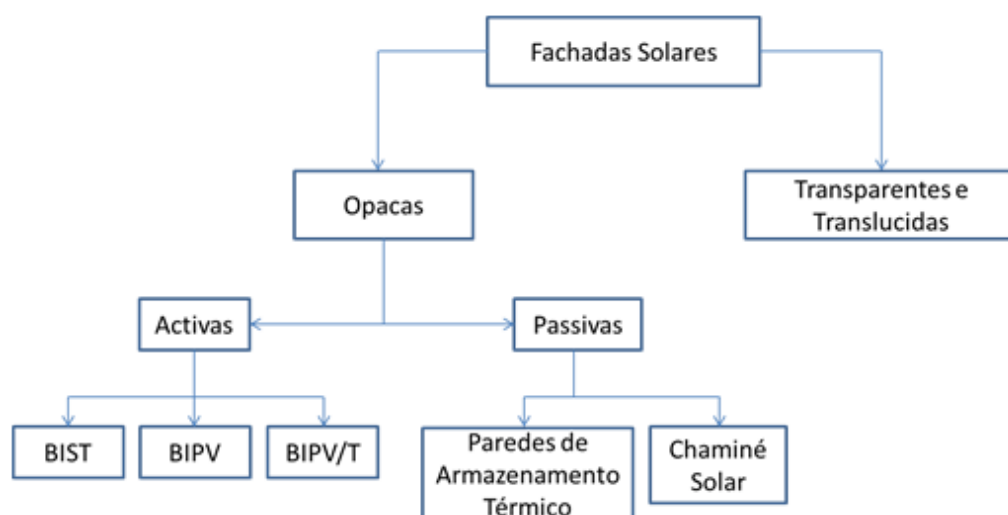


Figura 1.1 – Diagrama de subdivisão das fachadas solares [1]

Guillermo dividiu as fachadas solares em dois grandes grupos, as Fachadas Opacas e as Fachadas Transparentes e Translúcidas. No qual identificou as fachadas opacas como as que absorvem e reflectem a radiação solar, mas não a transferem directamente. Enquanto que as transparentes transferem também a radiação.

O autor optou por dividir ainda as fachadas opacas em dois grupos: as Activas, quando têm uma componente de produção eléctrica ou quando utilizam equipamentos eléctricos ou mecânicos, como bombas, ventoinhas, entre outros; e as Passivas, que são as restantes, por não possuírem elementos activos.

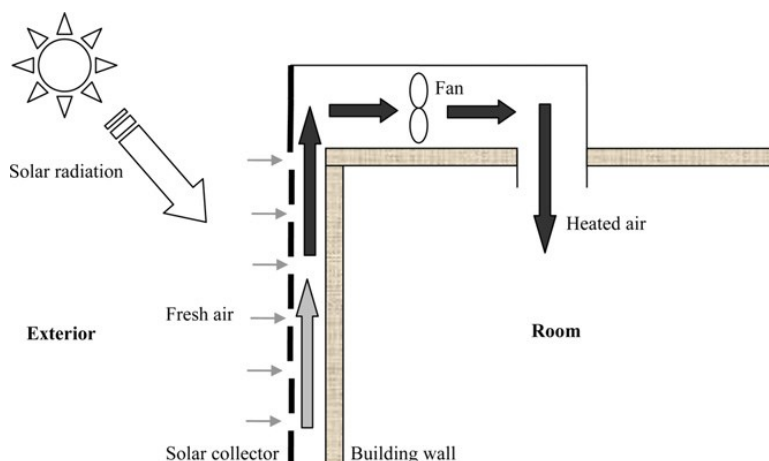
As fachadas opacas englobam as tecnologias: BIST (Building Integrated Solar Thermal); BIPV (Building Integrated Photovoltaic); BIPV/T (Building Integrated Photovoltaic/Thermal); Paredes de Armazenamento Térmico; e as Chaminés Solares.

As fachadas Transparentes e Translúcidas englobam desde as simples fachadas com o propósito do aproveitamento térmico da energia, como as fachadas envidraçadas, até às fachadas com integração do fotovoltaico semitransparente [3].

Na presente revisão optou-se por focar as tecnologias do grupo na qual o sistema em estudo, BIPV/T-PCM, está inserido, as fachadas opacas.

### BIST – Building Integrated Solar Thermal

Os sistemas BIST têm um propósito duplo, são a fachada de um edifício, ao mesmo tempo que colectam a energia solar para aquecimento. São exemplo desta tecnologia, os colectores solares a ar, que através da energia solar aquecem o ar que flui na fachada, aquecendo-o e posteriormente entrando no edifício (Figura 1.2). Em alguns destes sistemas, o ar antes de entrar no edifício passa também pelo telhado, obtendo assim um acréscimo energético.



**Figura 1.2 – Building Integrated Solar Thermal [1]**

Segundo Hernández et al [4], que desenvolveram um sistema de modelação para colectores solares a ar, é possível obter eficiências diárias de 67%.

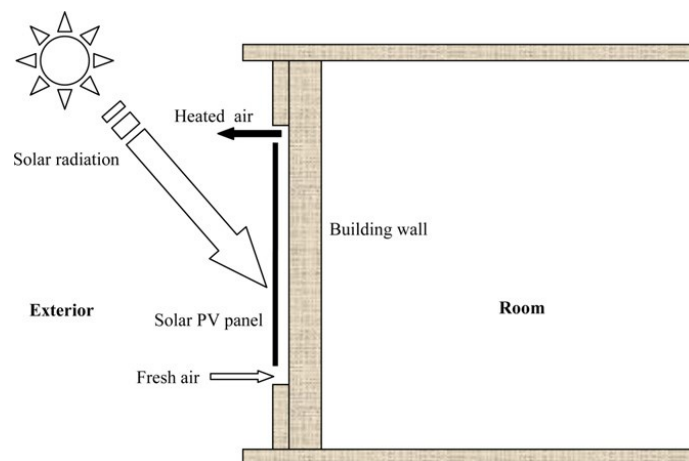
Embora os sistemas a ar sejam uma mais-valia por necessitarem de menos manutenção [5], não existem apenas sistemas que utilizem o ar como fluido de trabalho. No Departamento de Mecânica da Universidade de Tecnologia do Chipre desenvolvem outros tipos de sistemas de colecção da energia solar em fachadas, sem recurso ao ar (Figura 1.3).



**Figura 1.3 – Building Integrated Solar Thermal, Universidade de Tecnologia do Chipre**

### BIPV – Building Integrated Photovoltaic

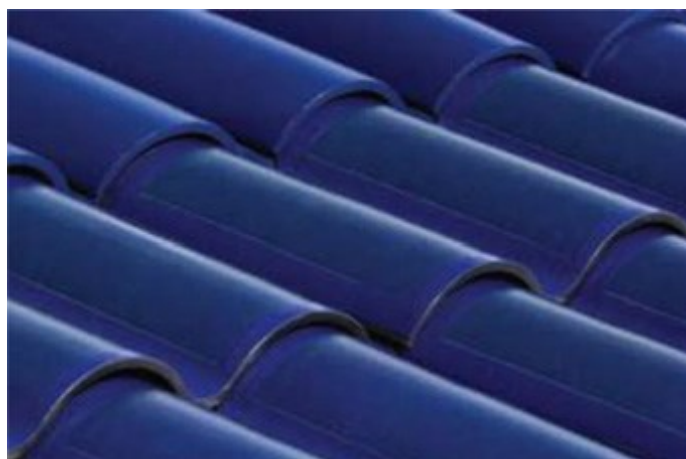
Nos sistemas BIPV as células fotovoltaicas são incorporadas nas fachadas dos edifícios, ou até noutras estruturas do mesmo. Quando estas são incorporadas nas fachadas, é deixado algum espaço entre a estrutura do edifício e o PV, permitindo que nesse espaço se faça ventilação natural do PV e até do edifício (Figura 1.4).



**Figura 1.4 – Building Integrated Photovoltaic [1]**

Nos estudos feitos por Yang et al [6], a integração de fotovoltaico no edifício perfeitamente entre 33 a 50 % da energia consumida em equipamentos de refrigeração.

As células fotovoltaicas são integradas nos edifícios sob a forma de: módulos fotovoltaicos, como é comum; películas dobráveis de células; e até em telhas (Figura 1.5); entre outras formas de aplicação [7].



**Figura 1.5 – Integração de células fotovoltaicas em telhas [7]**

### BIPV/T – Building Integrated Photovoltaic Thermal

Os sistemas BIPV/T nasceram da combinação dos sistemas BIST e BIPV, juntando assim as vantagens de ambos os sistemas, podendo obter energia sob a forma térmica e eléctrica, obtendo assim uma maior eficiência.

Existem já instalados sistemas BIPV/T em diversos edifícios, dos quais o edifício SOLAR XXI é um exemplo (Figura 1.6).



**Figura 1.6 – Edifício Solar XXI**

### Paredes de Armazenamento Térmico

As paredes de armazenamento térmico têm como função colectar e armazenar a energia proveniente do Sol.

O exemplo mais conhecido das paredes térmicas é a Trombe-Wall (Figura 1.7), esta é composta por um vidro e uma parede, e pode possuir também entradas e saídas de ar para o interior do edifício. A radiação solar aquece o ar e a parede, aquecendo posteriormente o interior do edifício. Este elemento funciona segundo o princípio do efeito de estufa. A radiação solar atravessa o vidro, é absorvida ou reflectida pela parede, sendo que já só uma pequena parte volta a atravessar o vidro novamente, fazendo com que uma grande quantidade de energia fique armazenada na parede e no ar entre o vidro e a parede.

A Trombe-Wall foi idealizada e patenteada por Edward Morse em 1881, embora só tenha sido desenvolvida como um elemento arquitectónico passado quase um século, em 1960, por Félix Trombe [8,9].

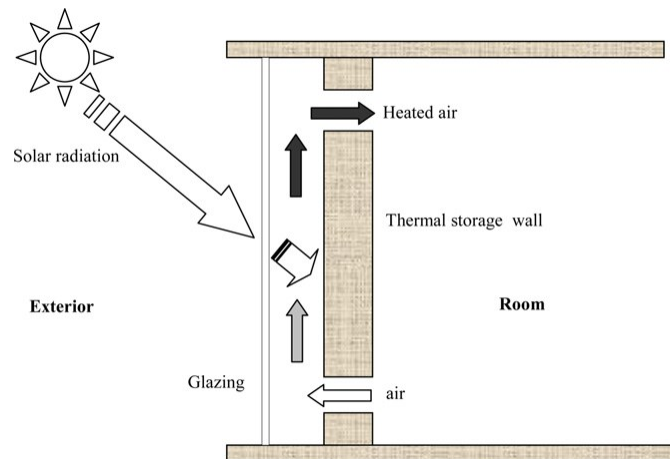


Figura 1.7 – Paredes de Armazenamento Térmico [1]

Jaber e Ajib [10] desenvolveram um estudo acerca da elaboração ótima de uma Trombe wall na região do Mediterrâneo, no qual mostraram a relação entre a área de Trombe Wall e a energia poupada (Figura 1.8). É de notar que o declive da curva referente à poupança energética vai diminuindo, cessando essa descida quando a Trombe Wall perfaz cerca de 37% da área da fachada.

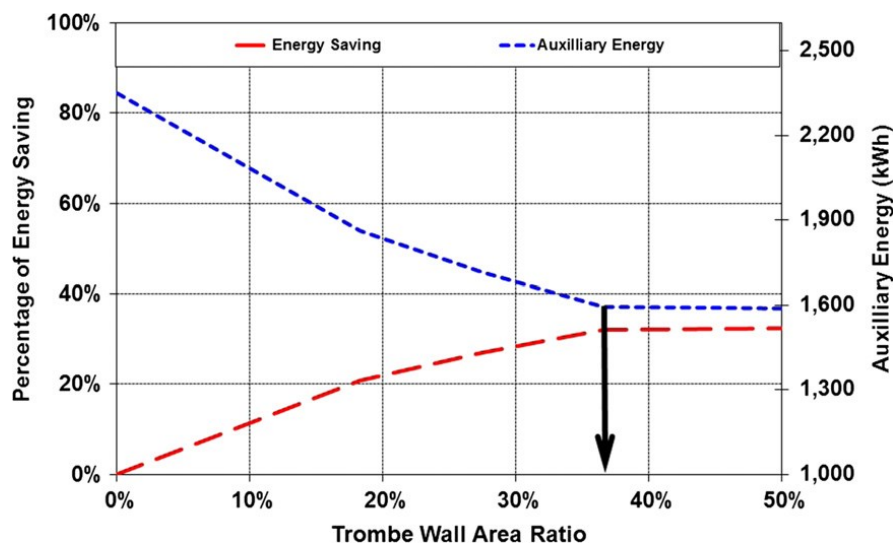


Figura 1.8 – Energia poupada em função da área de Trombe wall [10]

O edifício do NREL, no Colorado, foi construído com 44% da sua parede virada a sul, na qual foi incorporada uma Trombe Wall com 20 cm, sendo que se conseguiu que 20% da energia referente ao aquecimento anual seja fornecido pela Trombe Wall [11].

As paredes compostas ou nas quais é incorporado PCM também são um exemplo de paredes de armazenamento térmico. Estas possuem uma característica que lhes dá uma grande vantagem, a sua capacidade de armazenamento de calor latente.

Athienitis et al [12] desenvolveram um estudo no qual investigaram o impacto da incorporação de PCM nas paredes de uma sala de teste, na poupança de energia. A temperatura da sala de testes sem PCM chegou aos 30°C, valor bastante acima dos 26°C obtidos na sala de teste com PCM. O estudo afirma que se pode obter uma poupança de 15% na energia consumida em aquecimento.

### 1.2.2 BIPV/T-PCM

Os sistemas BIPV/T-PCM nasceram da associação das tecnologias de BIPV/T e das Paredes de armazenamento térmico com PCM, podendo enquadrar-se esta tecnologia na árvore ilustrada anteriormente da forma representada na Figura 1.9.

Esta junção de conceitos é ainda uma novidade, não existindo muitos estudos teóricos ou experimentais desenvolvidos.

Athienitis et al [13] desenvolveram e estudaram um sistema BIPV/T-PCM, no qual o PV é incorporado no interior de dois vidros, entre os quais existe um fluxo de ar proveniente e com destino ao interior do edifício, utilizando ainda PCM para refrigerar o PV. Este estudo demonstrou valores de eficiência na ordem dos 65 a 70%.

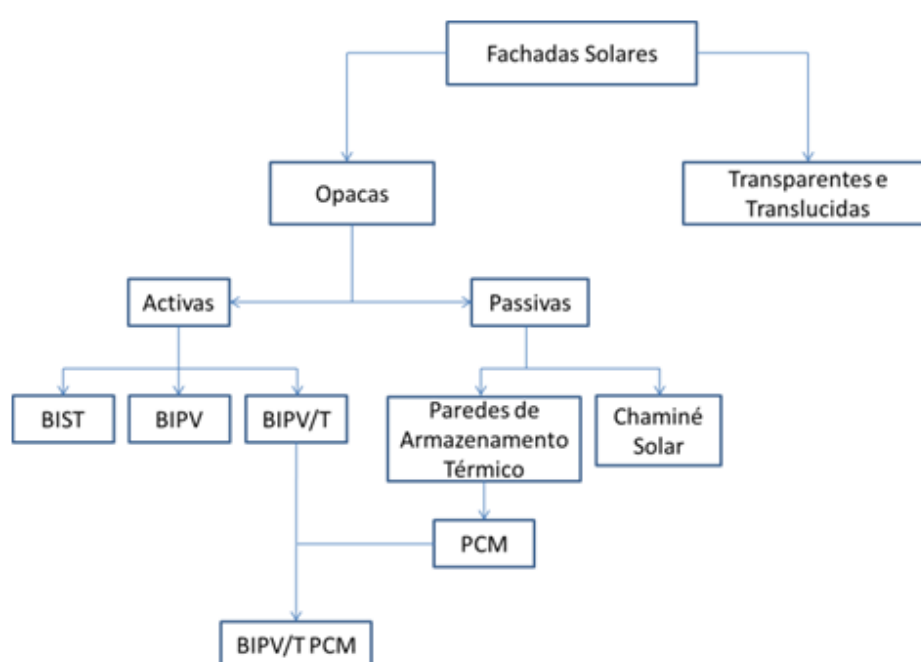


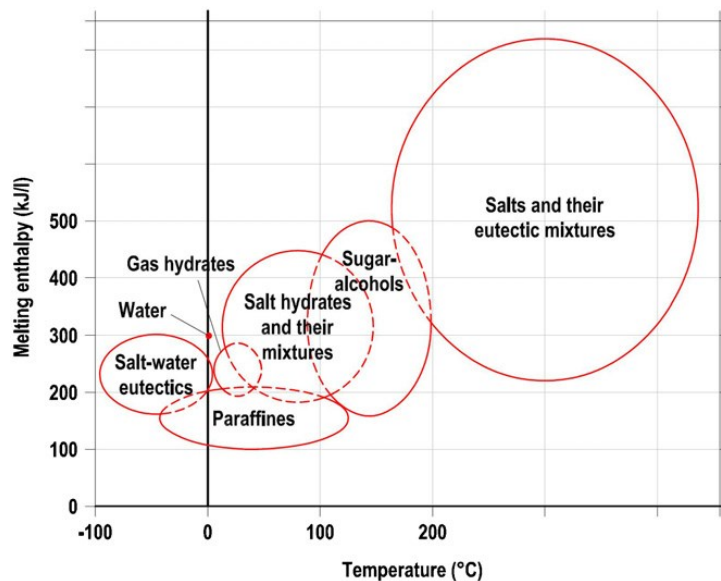
Figura 1.9 – Diagrama de subdivisão das fachadas solares, incluindo o BIPV/T-PCM

Laura Aelenei et al [14] desenvolveram também um protótipo de BIPV/T PCM, composto por um PV na parte frontal da fachada, existindo uma cavidade na parte traseira do mesmo, e ainda um PCM de gesso cartonado em contacto directo com a sala. Com este protótipo mostrou-se ser possível obter eficiências de 20%.

### 1.2.3 Materiais de mudança de fase – PCM

Os materiais de mudança de fase têm surgido como uma opção aos materiais comuns de construção de paredes, uma vez que permitem armazenar energia sob a forma de calor latente. Devido a isso possuem uma maior capacidade de armazenamento de calor por unidade de volume, em comparação com os materiais convencionais [15].

O vasto leque de materiais de mudança de fase existente pode ser visualizado na Figura 1.10.



**Figura 1.10 – Tipos de materiais de mudança de fase existentes [15]**

O PCM utilizado no sistema em estudo é produzido pela Dupont, e é uma parafina.

Os materiais de mudança de fase são já uma aplicação, uma vez que várias empresas já os comercializam para fins construtivos.

Os PCM podem ser incorporados de diversas formas nos edifícios. Tyagi e Buddhi [16] criaram uma classificação referente às formas de integração dos PCM, que consiste em três tipos:

1. PCM nas paredes dos edifícios;
2. PCM noutros componentes dos edifícios, como o chão ou o tecto;
3. PCM em sistemas separados de armazenamento de calor ou frio.

Para o tipo 3, o menos comum, Servando Alvarez et al [16] desenvolveram e estudaram sistemas de armazenamento de calor ou frio, separados da parede, utilizando PCM. Estes sistemas têm como diferenciação perante outros sistemas de PCM com ventilação forçada, a sua grande capacidade de transferência de calor devido à grande área de transferência de calor que possuem. Desenvolveram três tipos de sistemas: com PCM em forma de alhetas paralelas; em cilindros; e em esferas. Conseguindo assim uma área de transferência de calor entre o PCM e o ar que pode chegar a ser 3,6 vezes superior à de uma simples placa de PCM.



## 2. Descrição do Sistema BIPV/T-PCM

### 2.1 Considerações gerais

Os edifícios possuem um diagrama de necessidades energéticas térmicas e eléctricas que pode ser satisfeito em parte com sistemas activos ou passivos de aproveitamento da energia solar.

A nível de integração em edifícios de sistemas de produção de energia eléctrica através da energia solar, as soluções são poucas e resumem-se basicamente ao fotovoltaico.

Termicamente, as soluções são mais variadas, e podem ser sistemas passivos, como as fachadas envidraçadas, bem como sistemas activos, como é o exemplo dos ar condicionadores solares.

Na visão do utilizador do edifício, o requisito a cumprir é que a temperatura do edifício se mantenha na temperatura de conforto (ou intervalo de temperaturas de conforto). Por vezes isto torna-se de certa forma incompatível com os sistemas de aproveitamento de energia solar, uma vez que nos períodos de insolação a temperatura do edifício sobe acima da temperatura de conforto, e nos períodos de não insolação a temperatura do edifício desce abaixo da temperatura de conforto (Figura 2.1). Desta forma, embora se consiga captar a energia solar e diminuir as necessidades energéticas dos edifícios, a temperatura de conforto dos edifícios não é garantida.

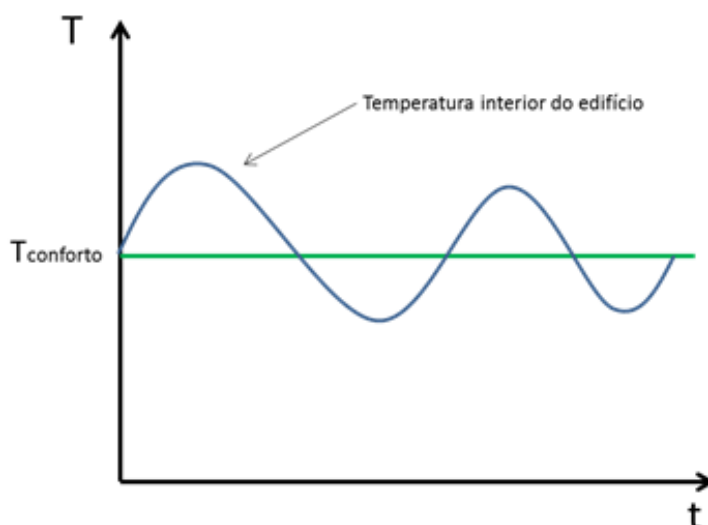
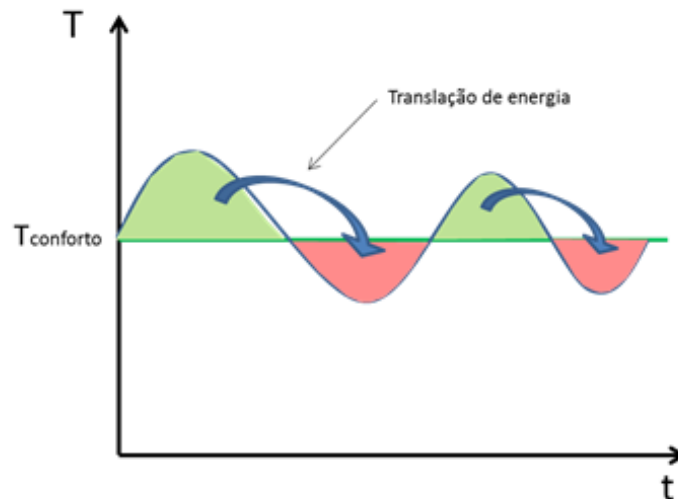


Figura 2.1 – Variações térmicas e temperatura de conforto

Ao tempo em que a temperatura do edifício está acima da temperatura de conforto corresponde um excesso de energia, da mesma forma, ao tempo em que a temperatura está abaixo da temperatura de conforto corresponde uma necessidade de energia. É portanto claro que existe a necessidade de fazer uma translação da energia térmica dos períodos em que existe excesso de energia para os períodos em que existe carência de energia, como se pode entender na Figura 2.2.





**Figura 2.2 – Translação de energia térmica**

O armazenamento da energia é a solução que permite que se faça essa translação temporal da energia entre períodos, e entre espaços. É nesse sentido que o sistema em estudo representa um sistema completo de captação, armazenamento e gestão da energia.

A utilização dos sistemas BIPV/T-PCM nos edifícios é importante na medida em que têm uma componente de produção de energia eléctrica, e por outro lado contribuem para o conforto térmico do edifício funcionando como recuperador de calor (BIPV/T) ou armazenador de calor (BIPV-PCM), de forma a regular as diferenças de temperatura entre o exterior e o interior.

Há que referir o importante facto de os módulos fotovoltaicos operarem com maior eficiência quando se encontram a temperaturas mais baixas, assim sendo, uma vez que neste sistema o PV funciona como fonte quente de um permutador de calor, espera-se que esse fenómeno de arrefecimento do mesmo melhore a sua eficiência.

## 2.2 Descrição do sistema

De forma a conseguir obter as capacidades de captação, armazenamento e gestão de energia, o sistema em estudo é composto por (Figura 2.3):

- 1) Módulo Fotovoltaico;
- 2) Cavity de Ar;
- 3) Bateria Térmica de PCM;
- 4) Ventiladores;
- 5) Comportas e Gavetas.

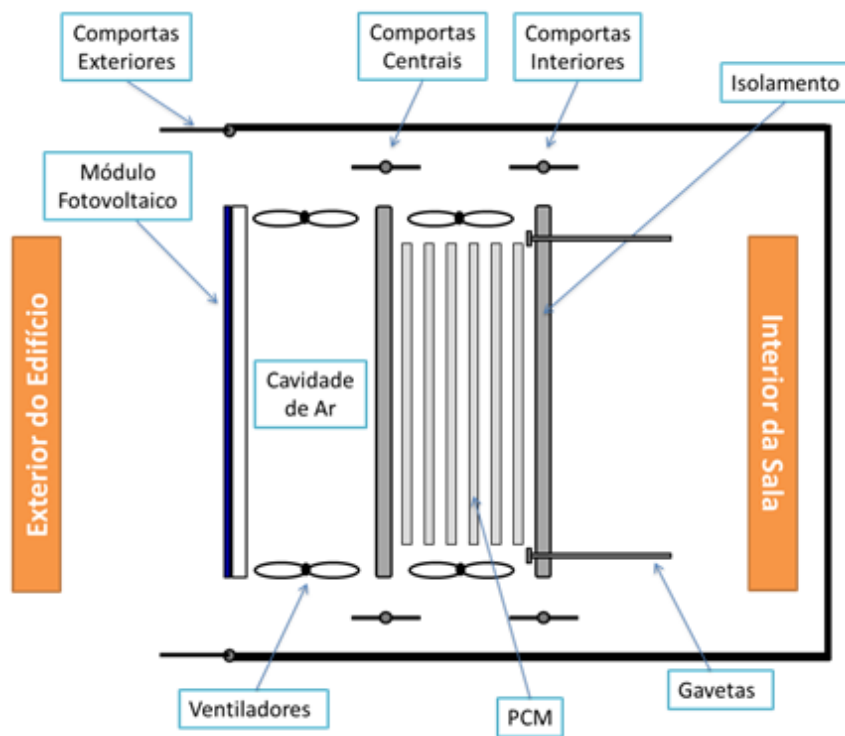


Figura 2.3 – Descrição dos componentes do sistema

### 2.2.1 Módulo fotovoltaico

A capacidade de captação de energia é conseguida através de um módulo fotovoltaico (Figura 2.4), fazendo este por um lado a conversão em energia eléctrica, e por outro a transmissão por fluxo convectivo de uma parte da restante energia para a cavidade de ar, que se encontra atrás do PV.



Figura 2.4 – Parte frontal do sistema, módulo fotovoltaico

O módulo fotovoltaico utilizado no sistema é um Kyocera KD145GH-4YU, com uma potência nominal de 145W para as condições padrão (Irradiância normal incidente de  $1000 \text{ W/m}^2$ , Temperatura das células de  $25^\circ\text{C}$ , Distribuição espectral AM1.5).

O módulo fotovoltaico do sistema em estudo teve que ser ligado em série com o módulo fotovoltaico do primeiro protótipo do projecto (referido no resumo), uma vez que a única forma de o colocar a funcionar seria ligá-lo à rede. Os inversores disponíveis no mercado não possuíam características técnicas que mostrassem ser possível o emparelhamento com este módulo fotovoltaico sozinho, uma vez que a tensão de funcionamento do módulo era demasiado baixa. Sendo assim, colocaram-se os dois módulos em série, aumentando assim a tensão do conjunto.

Os módulos fotovoltaicos, do primeiro protótipo do projecto e do sistema em estudo, não são idênticos, sendo o primeiro de menor potência. Este fenómeno faz obviamente com que o inversor procure o ponto de máxima potência do conjunto, e não apenas do módulo do sistema em estudo, fazendo com que a produção eléctrica do mesmo desça um pouco.

O inversor utilizado foi um Enecsys SMI-240W-60-UL (Figura 2.5).



**Figura 2.5 – Inversor**

### **2.2.2 Cavity de ar**

A cavidade de ar é a estrutura onde o ar circula de forma a fazer a permuta de calor entre o PV e esse mesmo ar, servindo o ar de fluido de trabalho, transportando o calor posteriormente para o interior da sala, para o exterior, ou para a bateria térmica. A largura da cavidade de ar, ou seja, a distância entre o PV e a bateria térmica, é de 10 cm.

O escoamento na cavidade de ar é auxiliado por um conjunto de 10 ventiladores, como se pode ver na Figura 2.6.



Figura 2.6 – Cavidade de ar

### 2.2.3 Bateria térmica de PCM

O armazenamento é fundamentado num conceito de bateria térmica, que se baseia num conjunto de placas de PCM (phase change material ou materiais de mudança de fase) colocadas paralelamente no interior de uma caixa isolada, que tem por objectivo ser termicamente adiabática (Figura 2.7).

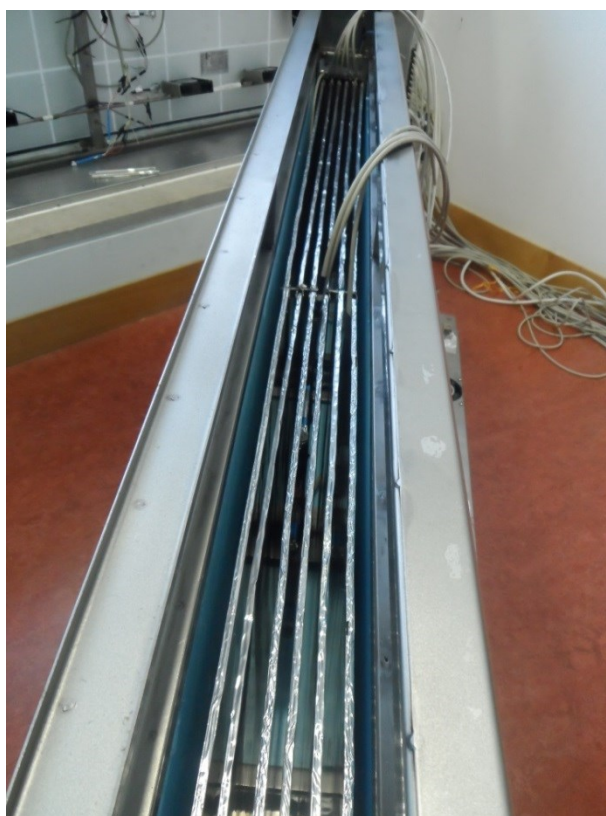


Figura 2.7 – Bateria térmica, placas paralelas

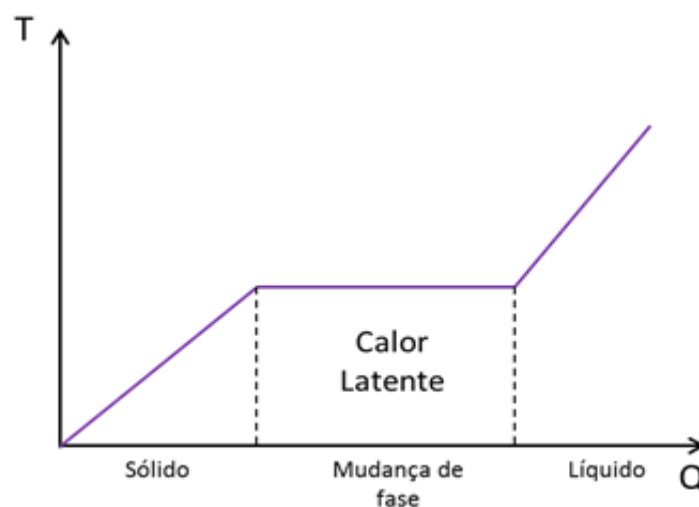
A bateria de PCM é isolada por todos os lados com placas de poliestireno, de forma a que não existam trocas de calor entre o PCM e o exterior, em ambos os sentidos. Mais à frente se verá que no inverno é importante evitar o fluxo de calor do PCM para o exterior da bateria, e no verão é importante evitar que o calor flua do exterior da bateria para o PCM.

O facto de serem várias placas de PCM com pequena espessura faz com que a área de transferência de calor seja grande, aumentando assim a taxa de transferência de calor entre o PCM e o ar. As placas de PCM são inseridas em ranhuras, o que permite colocar uma maior quantidade ou uma menor quantidade em função da quantidade de armazenamento que se pretende. Neste caso foram utilizadas 12 placas de PCM, que perfaz cerca de 16,8 kg, o que equivale a 1428 kJ de calor latente. É ainda importante referir que a bateria é um componente removível, como pode ver-se na Figura 2.8.



**Figura 2.8 – Bateria térmica, componente removível**

No sistema em estudo foi incorporado um PCM da marca Dupont, sendo o seu material de base uma parafina (Características no anexo II). Os PCM na sua mudança de fase de sólido para líquido apresenta teoricamente uma curva Q-T (Figura 2.9) composta por três rectas: sólido, sólido-líquido, líquido.



**Figura 2.9 – Curva Q-T, Diagrama de mudança de fase**



Como é sabido um material na sua mudança de fase armazena ou liberta calor, no entanto a sua temperatura mantém-se constante, a esse calor chama-se calor latente. Isso já não acontece na fase de sólido ou líquido, em que o calor armazenado ou libertado provoca uma mudança de temperatura no material. A esse calor chama-se calor sensível. É em torno do calor latente que é suposto os PCM trabalharem. Embora armazenem também calor na zona de calor sensível, a zona de calor latente é a que lhes proporciona o facto de conseguirem armazenar uma quantidade significativa de calor sem que o material aumente a sua temperatura. O facto de o material não aumentar a sua temperatura tem benefícios, pois embora armazene energia, como a temperatura não sobe, diminui as perdas de calor para a envolvente.

Na verdade a curva apresentada anteriormente é uma curva teórica, e na realidade o gráfico não é composto apenas por rectas, nem a mudança de fase é feita a temperatura constante. Ainda assim existe obviamente uma tendência da curva real para seguir a curva teórica, seguindo mais ou menos a sua forma. É de notar que na zona de calor latente o declive da curva diminui, e volta depois a subir quando entra na zona de estado líquido, ou seja, mantém-se a importante característica da temperatura subir muito pouco na zona de mudança de fase.

Os dados que permitiram a elaboração da curva representada (Figura 2.10) tiveram como base um estudo feito ao PCM que foi utilizado no sistema [17].

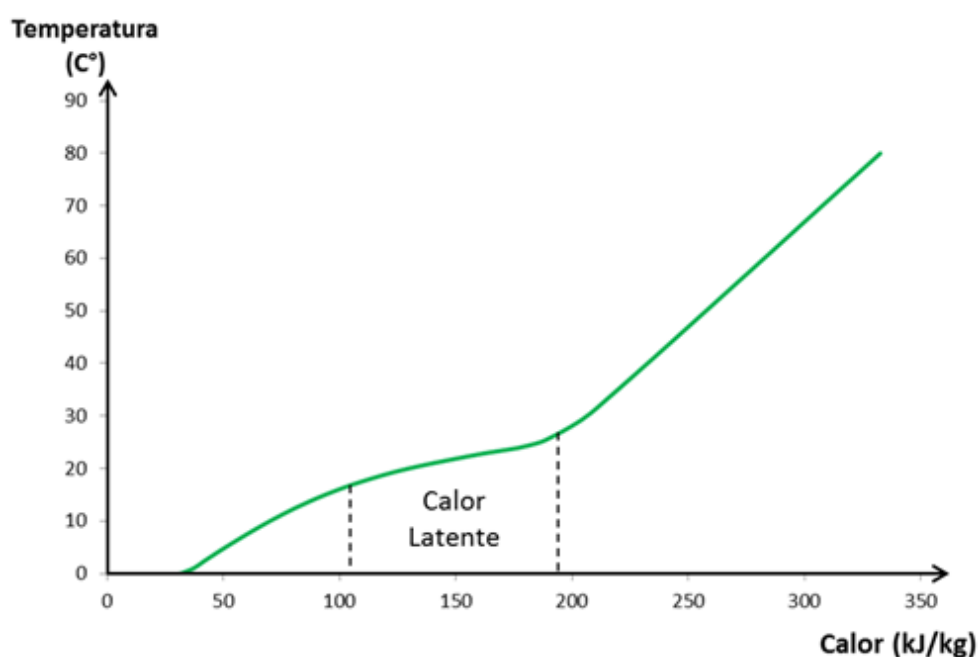


Figura 2.10 – Curva Q-T, Temperatura do PCM em função do calor armazenado [17]

O gráfico Q-T (Calor-Temperatura) do PCM é de facto um agente informativo essencial para a análise do protótipo, uma vez que nos dá a informação da energia armazenada no PCM em função da temperatura do mesmo. Assim, colocando um sensor de temperatura na superfície do PCM, conseguimos saber quanta energia está armazenada naquele momento. Esta informação é fundamental para que se faça uma correcta gestão da energia disponível, e para que se consiga fazer a análise do sistema.

## 2.2.4 Ventiladores

Os ventiladores são o componente que garante o escoamento do fluido de trabalho, o ar, entre as fontes quentes e frias do sistema.

Existem dois grupos de ventiladores: Os ventiladores da cavidade de ar; e os ventiladores da bateria térmica.

O grupo de ventiladores da cavidade de ar é composto por 10 ventiladores, 6 na parte superior da cavidade de ar, e os restantes 4 na parte inferior, como se pôde ver na Figura 2.6 apresentada no subcapítulo 2.2.2.

O grupo de ventiladores da bateria térmica é composto por 5 ventiladores, 3 na parte superior e 2 na parte inferior (Figura 2.11).



Figura 2.11 – Ventiladores da bateria térmica

Os ventiladores utilizados são da marca *LUFT* e do modelo KLA230AP092CSWH. Por uma questão construtiva optou-se por utilizar estes ventiladores, que são ventiladores AC e que têm uma potência de 16W cada um. No entanto, o mesmo fornecedor disponibiliza os mesmos ventiladores com alimentação em DC e com características de escoamento muito semelhantes, sendo a potência dos ventiladores DC 4,32W, uma potência claramente inferior. Sendo assim, ao longo da análise experimental, utilizou-se o valor de potência dos ventiladores igual a 4,32W, uma vez que embora não sejam os ventiladores que foram instalados, as características são idênticas e não afecta a eficiência do sistema por ineficiência dos ventiladores.

### 2.2.5 Comportas e gavetas

O sistema em estudo pode ser organizado em quatro meios entre os quais existe permuta de calor: o módulo fotovoltaico, a bateria térmica, o interior da sala e o exterior do edifício. Através do controlo das comportas e gavetas (em conjunto com os ventiladores) é possível fazer a gestão da transferência de calor entre os quatro meios referidos anteriormente, pois as comportas e gavetas isolam esses meios uns dos outros impedindo que o ar flua entre eles.

Assim, as comportas, as gavetas e os ventiladores são consideradas os actuadores do sistema de gestão de energia.

O sistema é composto por 3 conjuntos de comportas, 1 conjunto de gavetas e 2 grupos de ventiladores, que foram nomeados da seguinte forma (Figura 2.12; Figura 2.13):

- a) Comporta central inferior e superior;  
-Divide a cavidade de ar da bateria térmica/sala.
- b) Comporta interior inferior e superior;  
-Divide a sala da cavidade de ar/bateria térmica.
- c) Gavetas isoladoras da bateria;  
-Isola a bateria térmica, fechando as aberturas dos ventiladores.
- d) Ventiladores da bateria;
- e) Ventiladores da cavidade de ar;
- f) Comporta exterior inferior e superior.  
-Divide o exterior do edifício da cavidade de ar/bateria térmica/sala.

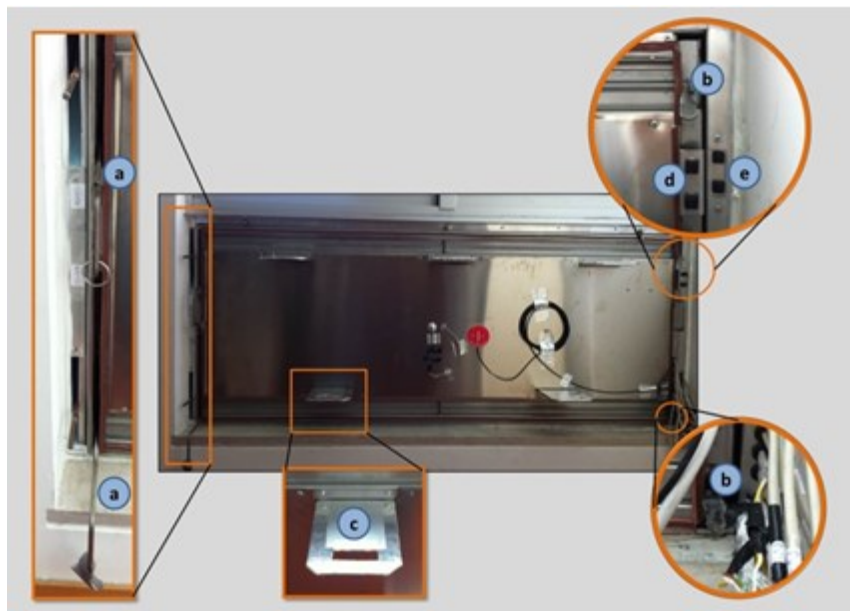


Figura 2.12 – Actuadores do sistema, parte interior





Figura 2.13 – Actuadores do sistema, parte exterior

## 2.2.6 Equivalente eléctrico

Para melhor compreensão da componente térmica do sistema que tem sido descrito ao longo deste capítulo, pode fazer-se uma representação eléctrica equivalente. Essa representação é ilustrada na Figura 2.14.

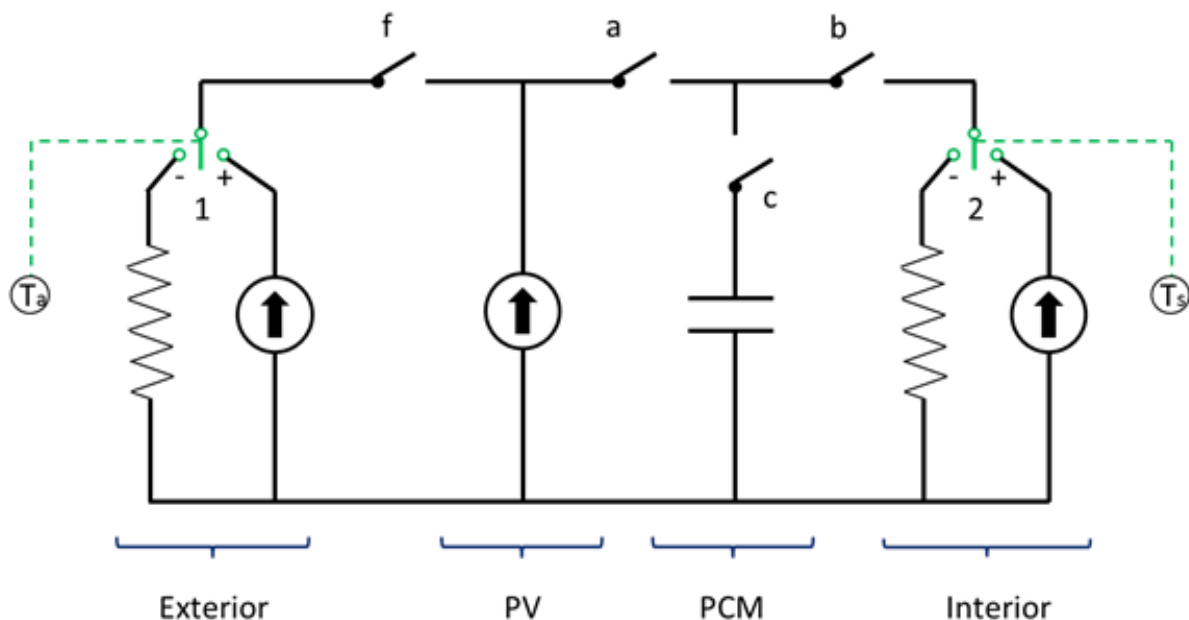








Figura 2.14 – Equivalente eléctrico

Cada um dos componentes é representado com o símbolo equivalente. O módulo fotovoltaico é considerado uma fonte de calor, a bateria térmica um armazenador de calor, e tanto o interior como o exterior podem ser considerados uma fonte ou um dissipador de calor consoante a temperatura a que se encontrem. Os interruptores 1 e 2 ilustrados na figura representam interruptores associados a um sensor de temperatura, consoante a temperatura é definido se o interior ou o exterior representam uma fonte ou um dissipador de calor.

Simbologia	Designação Eléctrica	Designação equivalente
	Fonte de Corrente	Fonte de Calor
	Dissipador de Corrente	Dissipador de Calor
	Condensador	Bateria Térmica
	Interruptor	Comportas e Gavetas
	Sensor de Temperatura	
	Interruptor dependente da Temperatura	

Quadro 2.1 – Legenda da figura Figura 2.14

## 2.3 Princípio de funcionamento

Como se tem descrito ao longo deste capítulo o sistema em estudo é um sistema que engloba três competências principais: a captação, o armazenamento e a gestão energética. Sendo que a gestão energética é o cérebro de todo o sistema, uma vez que sendo este sistema tão versátil, sem uma boa gestão de nada serve o sistema de captação e armazenamento de energia, uma vez que esta pode não estar a fluir para onde se pretende.

O calor, como forma de energia, é portanto aqui o agente a ser gerido<sup>1</sup>, sendo que a fonte quente e a fonte fria, que podem ser um dos quatro meios de permuta de calor referidos anteriormente, vão variando consoante o objectivo final de cada modo de funcionamento.

Os modos de funcionamento são provenientes das diferentes combinações que são possíveis alterando o estado das comportas, gavetas e ventiladores. Cada modo de funcionamento tem um propósito distinto e tem por objectivo transferir calor de um sítio para outro.

Os modos de funcionamento do protótipo dependem portanto do estado aberto/fechado dos grupos de comportas e gavetas, e do estado ligado/desligado dos grupos de ventiladores. Existem dessa forma nove modos de funcionamento que garantem o fluxo de calor desejado entre meios, consoante o objectivo pretendido.

Esses modos de funcionamento estão genuinamente agregados a estações do ano embora não se possa associar directamente um modo de funcionamento a uma estação do ano concreta, pois pretende-se que a selecção dos modos de funcionamento seja feita com base em temperaturas reais e instantâneas medidas nos quatro meios de permuta de calor seguindo um código lógico e/ou até com base numa memória inteligente do sistema que se baseia em situações padrão anteriores. (também existem dias quentes no inverno, e dias frios no verão). Mais à frente, no capítulo 5.2 falar-se-á do código lógico de gestão energética proposto.

No entanto, e associando incorrectamente de forma consciente, os modos de funcionamento a estações do ano, existem cinco modos de funcionamento referentes ao inverno e quatro modos de funcionamento referentes ao verão. Estes estão referenciados no Quadro 2.2 e serão descritos nos subcapítulos seguintes. Na tabela estão descritas também as posições de cada uma das comportas e gavetas, e o estado dos ventiladores segundo a nomenclatura referida no subcapítulo 2.2.5.

<sup>1</sup> Ao longo deste capítulo a componente eléctrica do sistema terá menos foco, uma vez que os modos de funcionamento são uma variante da componente térmica apenas.

Modo de funcionamento		Comportas, Gavetas e Ventiladores					
		a)	b)	c)	d)	e)	f)
		Comportas Centrais	Comportas Interiores	Gavetas Bateria	Ventiladores Bateria	Ventiladores Cavidade de ar	Comportas Exteriores
Inverno	Modo 1 – Carregamento do PCM a partir do PV	Aberto	Fechado	Aberto	ON	OFF	Fechado
	Modo 2 – Aquecimento da sala a partir do PV	Aberto	Aberto	Fechado	OFF	ON	Fechado
	Modo 3 – Aquecimento da sala a partir do PCM	Fechado	Aberto	Aberto	ON	OFF	Fechado
	Modo 4 – Aquecimento da sala a partir do PV e do PCM	Aberto	Aberto	Aberto	ON	ON	Fechado
Verão	Modo 5 – Descarregamento do PCM para o exterior	Aberto	Fechado	Aberto	ON	OFF	Aberto
	Modo 6 – Carregamento do PCM a partir da sala + Ventilação do PV com o exterior	Fechado	Aberto	Aberto	ON	ON	Aberto
Inverno	Modo 7 – Inactivo Inverno	Fechado	Fechado	Fechado	OFF	OFF	Fechado
Verão	Modo 8 – Ventilação do PV com o exterior	Fechado	Fechado	Fechado	OFF	ON	Aberto
	Modo 9 – Inactivo Verão	Fechado	Fechado	Fechado	OFF	OFF	Aberto

Quadro 2.2 – Estado dos actuadores em função dos modos de funcionamento

### 2.3.1 Modo 1 – Carregamento do PCM a partir do PV (Inverno)

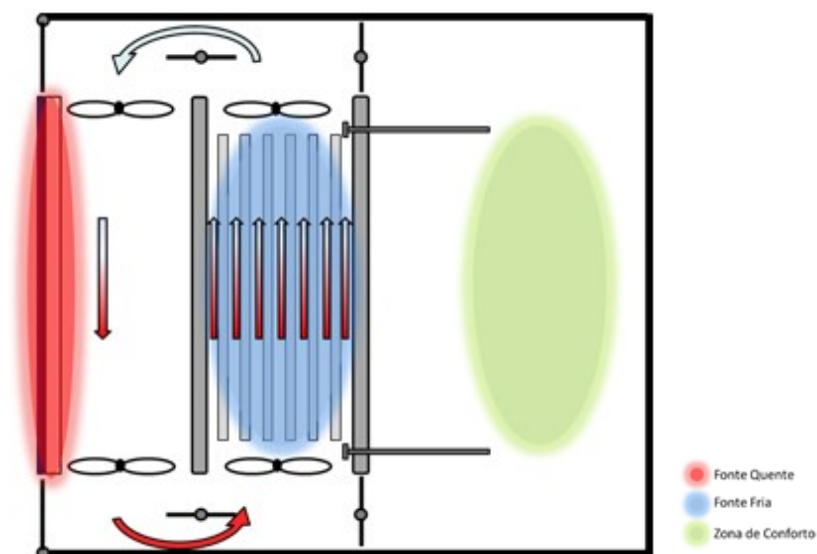


Figura 2.15 – Modo de funcionamento 1

O Modo de funcionamento 1 tem por objectivo fazer o armazenamento de calor (translação temporal de energia) proveniente do PV. Através dos ventiladores da bateria térmica, promove-se um escoamento cíclico entre a cavidade de ar e a bateria térmica, fazendo assim a transferência de calor do PV para o PCM. Quando o calor é transferido para o PCM é armazenado, fazendo subir a sua temperatura. Neste modo de funcionamento isola-se o protótipo do interior e do exterior através do fecho das comportas interiores e exteriores.

### 2.3.2 Modo 2 – Aquecimento da sala a partir do PV (Inverno)

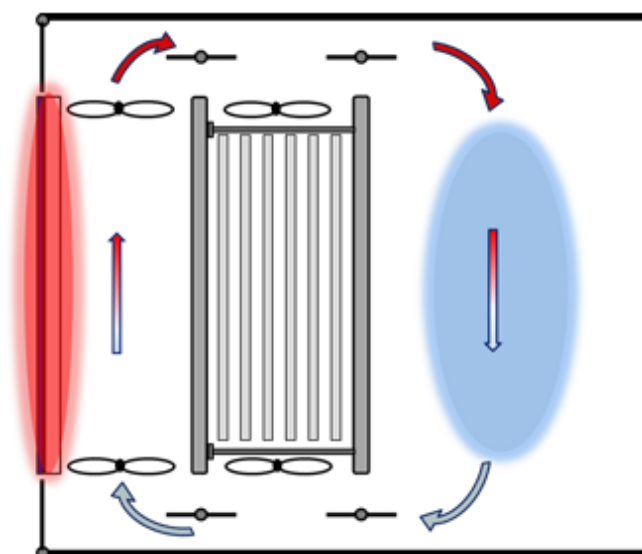


Figura 2.16 – Modo de funcionamento 2

O Modo de funcionamento 2 visa impor a transferência de calor do PV para o interior da sala, através do escoamento directo entre a cavidade de ar e o interior da sala. Este modo é utilizado quando não existe necessidade de se fazer um armazenamento da energia e a temperatura do edifício está abaixo da temperatura de conforto, fazendo-se assim um aproveitamento directo da mesma, obviamente com uma eficiência maior, uma vez que não existe um processo intermédio de armazenamento. Normalmente teria lógica optar por este modo de funcionamento em duas situações: quando a bateria térmica já está carregada e a temperatura do edifício está abaixo da temperatura de conforto; quando a bateria está descarregada mas se prevê que seja melhor carregá-la mais tarde ou ainda que não haja necessidade de a carregar. O fluxo de ar entre a cavidade de ar e o interior da sala é exercido pelos ventiladores da cavidade de ar.

### 2.3.3 Modo 3 – Aquecimento da sala a partir do PCM (Inverno)

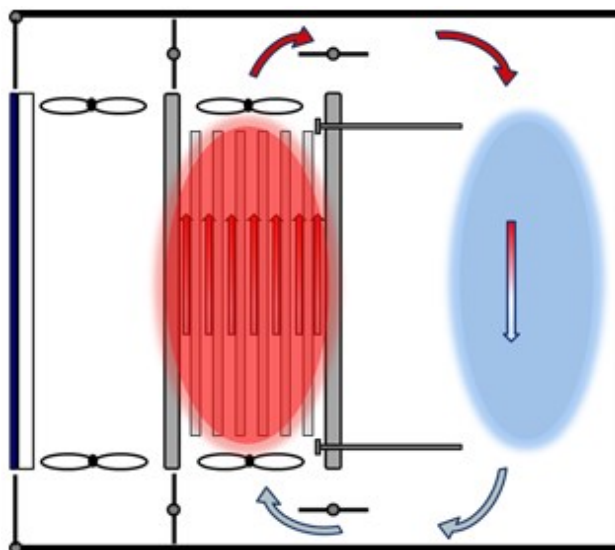


Figura 2.17 – Modo de funcionamento 3

O Modo de funcionamento 3 é complementar do Modo de funcionamento 1. Este tem por objectivo libertar a energia armazenada no Modo 1. O Modo 3 é posto em prática quando a temperatura do edifício está abaixo da temperatura de conforto, e a bateria térmica está carregada. Sendo assim, este modo de funcionamento promove a transferência de calor da bateria térmica para o interior da sala com recurso aos ventiladores da bateria. A cavidade de ar por trás do PV fica fechada, podendo numa primeira análise pensar-se que o ar dentro da mesma poderá atingir temperaturas elevadas, baixando assim a eficiência do módulo. No entanto, numa visão mais aprofundada, é possível notar que em princípio quando a energia do PCM é descarregada para o interior do edifício, é porque não existe a possibilidade de fazer uma transferência de calor directa entre o PV e o interior do edifício, ou seja, é quando o PV está frio, à noite.

### 2.3.4 Modo 4 – Aquecimento da sala a partir do PV e do PCM (Inverno)

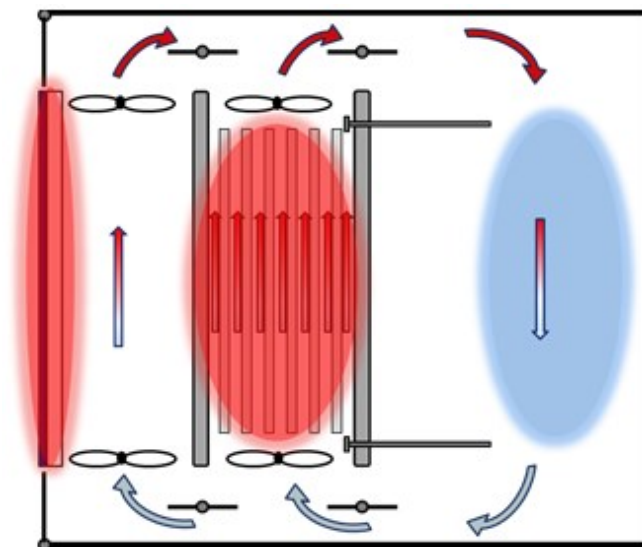


Figura 2.18 – Modo de funcionamento 4

O Modo de funcionamento 4 é uma combinação dos Modos de funcionamento 2 e 3. Este tem por objectivo fazer transferência de calor para o interior do edifício a partir do PCM e do PV ao mesmo tempo, recorrendo aos dois grupos de ventiladores. É um modo de funcionamento um pouco mais rebuscado, pois exige uma gestão da energia mais cuidada. O critério de funcionamento a cumprir para utilizar este modo, é garantir que tanto a temperatura do PCM como a temperatura do PV são superiores à temperatura da sala.

Tem lógica optar por este modo de funcionamento quando se verifica que apenas uma das fontes quentes não é suficiente, em termos de quantidade de energia, para aquecer o interior do edifício. A temperatura do ar que entra na sala estará entre a temperatura do PV e a do PCM, e será função do caudal imposto por cada grupo de ventiladores.

### 2.3.5 Modo 5 – Descarregamento do PCM para o exterior (Verão)

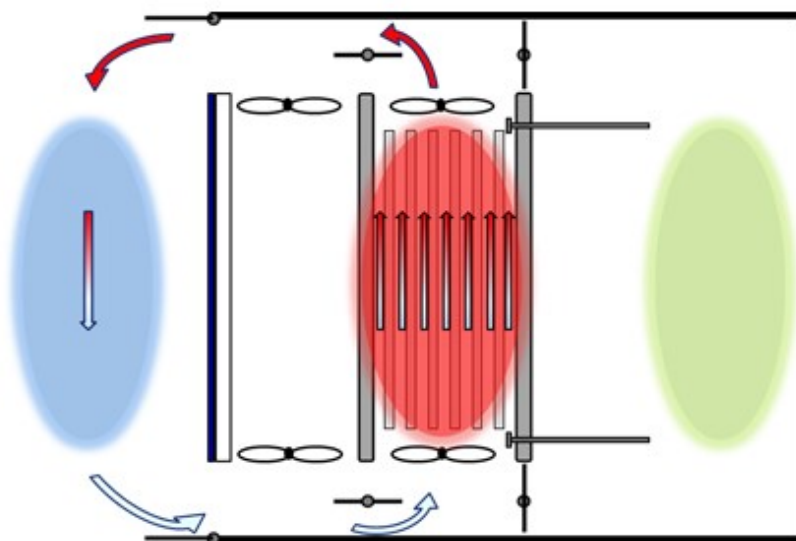


Figura 2.19 – Modo de funcionamento 5

O Modo de funcionamento 5, já pertence aos modos de funcionamento considerados de verão. Este tem por objectivo fazer o descarregamento para o exterior, da energia contida no PCM. Através dos ventiladores da bateria térmica, impõe um escoamento entre o PCM e o exterior do edifício.

O Modo de funcionamento 5 é uma preparação nocturna para os modos de funcionamento que irão estar activos durante o dia. Este garante que o calor que foi armazenado durante o dia no PCM é expelido para o exterior, baixando assim a sua temperatura, e preparando o PCM para absorver energia durante o dia seguinte, evitando assim que essa energia flua para o interior da sala, que é o que não se pretende no verão. Os modos de funcionamento de verão funcionam nesta linha de pensamento: durante a noite descarrega o PCM, durante o dia carrega o PCM.

### 2.3.6 Modo 6 – Carregamento do PCM a partir da sala + Ventilação do PV com o exterior (Verão)

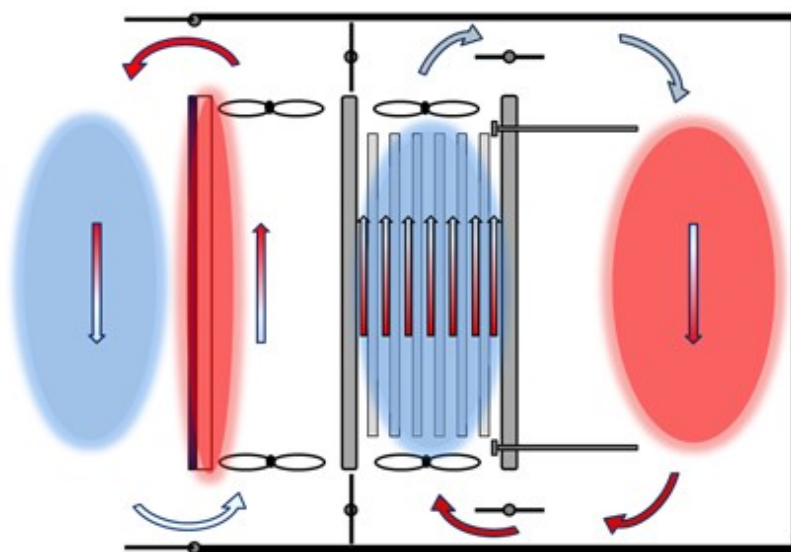


Figura 2.20 – Modo de funcionamento 6

Como foi referido anteriormente o Modo de funcionamento 5 é um complemento para o 6 (ou para o 8 e 9), tendo este como objectivo o arrefecimento da sala. O Modo de funcionamento 6 divide-se em duas componentes: por um lado aproveita-se o facto de o PCM estar descarregado e a uma baixa temperatura proveniente do Modo 5 para transferir energia do interior da sala para o PCM, arrefecendo a mesma; ao mesmo tempo, e uma vez que o Modo de funcionamento 6 é utilizado de dia, o PV encontra-se a temperaturas altas, dessa forma os ventiladores da cavidade de ar promovem o fluxo de ar entre a cavidade de ar e o exterior do edifício, de forma a que se transfira o calor do PV para o exterior, garantindo assim uma maior eficiência eléctrica por parte do mesmo.

Este seria um modo de funcionamento idealizado para o conceito projectado de que a bateria térmica seria exactamente adiabática, ou seja, que não existiriam trocas de calor através do isolamento, ou que seriam desprezáveis. No entanto, e como se verá na análise experimental, o Modo 6 não chegou a ser posto em prática pois a quantidade de calor transferida da cavidade de ar para a bateria térmica era muito elevada, fazendo com que se estivesse a transferir energia do PCM para a sala, e não da sala para o PCM. Foi a partir desta realidade que surgiram os Modos de funcionamento 8 e 9, que serão explicados nos subcapítulos seguintes.

### 2.3.7 Modo 7 – Inactivo Inverno

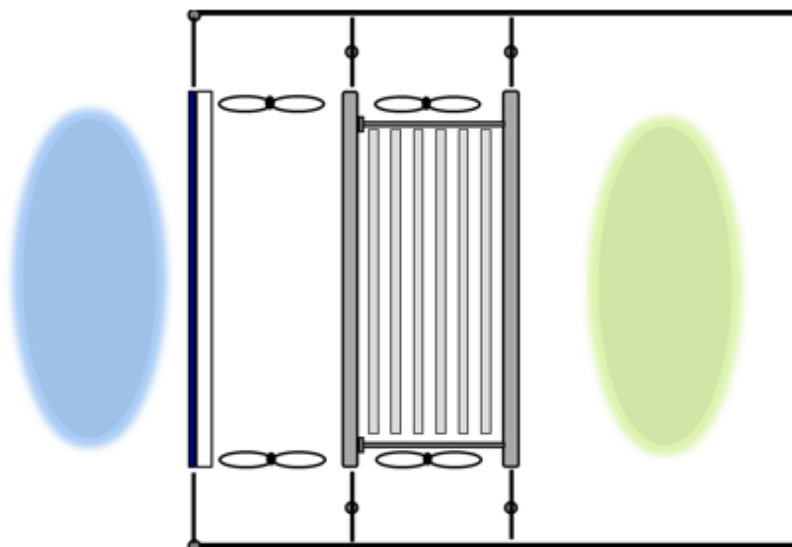


Figura 2.21 – Modo de funcionamento 7

O Modo de funcionamento 7 é um simples modo de inactividade para o período de inverno, em que todas as comportas e gavetas estão fechadas e os ventiladores estão desligados. Este modo é accionado no intervalo dos modos de funcionamento de inverno, quando não se considera que os Modos 1, 2, 3 ou 4 devem estar em funcionamento, e tem como objectivo manter estáticas as condições obtidas.

### 2.3.8 Modo 8 – Ventilação do PV com o exterior (Verão)

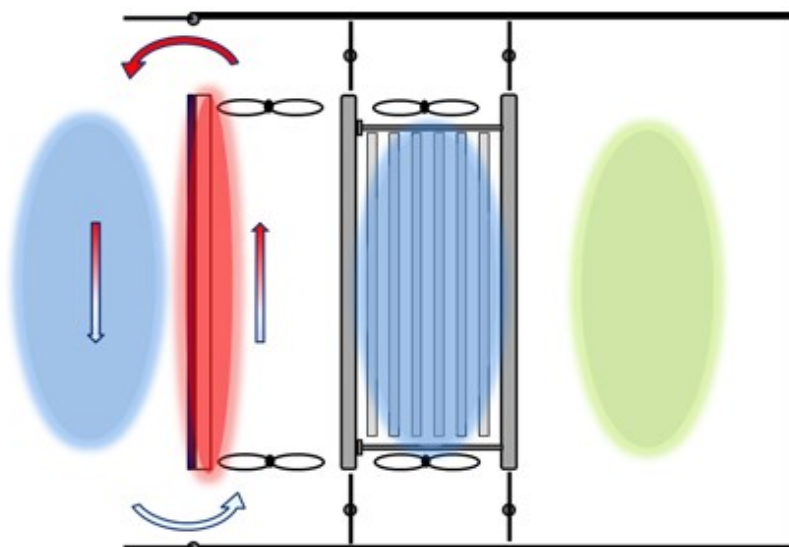


Figura 2.22 – Modo de funcionamento 8



O Modo de funcionamento 8 surge da incapacidade do sistema pôr em prática a ideologia do Modo de funcionamento 6, sendo assim uma simplificação do mesmo. Este modo tem apenas como objectivo o arrefecimento do PV, eliminando a componente de extracção de calor da sala para o PCM.

Tendo sido o PCM descarregado durante a noite através do Modo de funcionamento 5, o PCM encontra-se a uma baixa temperatura servindo neste modo de funcionamento, não como absorvedor de energia da sala, mas como isolador da energia que vem da cavidade de ar. A energia que flui da cavidade de ar para a bateria térmica é armazenada no PCM, evitando assim que esta flua para a sala. É neste sentido que os Modos de funcionamento 8 e 9 tornam o sistema em estudo, durante o verão, não um arrefecedor como se tinha idealizado no Modo 6 mas sim um isolador.

### 2.3.9 Modo 9 – Inactivo Verão

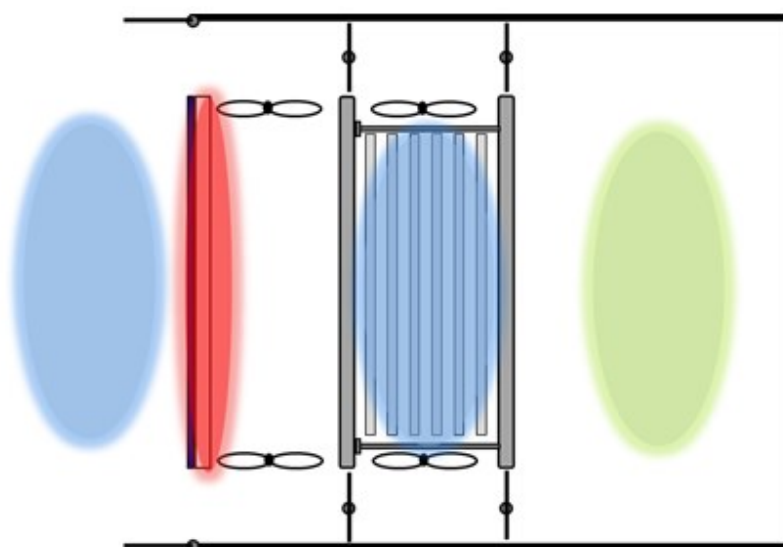


Figura 2.23 – Modo de funcionamento 9

O Modo de funcionamento 9 é equivalente ao Modo 8, ou seja, baseia-se também na lógica de isolamento da sala através do armazenamento de energia no PCM, diferenciando apenas no facto de não se consumir energia nos ventiladores, ou seja, os ventiladores da cavidade de ar não estão ligados. No entanto, as comportas exteriores estão abertas promovendo assim, se for caso disso, ventilação natural.

O Modo 9, tal como o Modo 7, tem por objectivo manter estáticas as condições, uma vez que é um modo de inactividade. A diferença entre eles, é o facto de no Modo 7 as comportas exteriores estarem fechadas enquanto que no Modo 9 estão abertas. Este facto deve-se a ter-se convencionado que as comportas exteriores são de movimentação sazonal, isto é, estão sempre abertas durante o período de verão, e sempre fechadas durante o período de inverno.

## 3. Equipamentos e Processos de Cálculo

### 3.1 Equipamentos e medidas

Os equipamentos de medida utilizados neste trabalho foram de grande relevância para o mesmo, uma vez que se tratou de um trabalho puramente experimental, e no qual se utilizaram vários tipos de sensores.

Para fazer a aquisição de dados foi utilizado um Agilent no qual estavam conectados os diversos equipamentos de medida. A aquisição de dados foi efectuada de 5 em 5 minutos. É importante referir que a temperatura ambiente ( $T_a$ ) foi registada noutro sistema de aquisição de dados, uma vez que o equipamento referente a essa medida já estava instalado no edifício para outros propósitos, e que a aquisição foi efectuada de 2 em 2 minutos.

#### 3.1.1 Irradiância

A irradiância é medida com um piranómetro Hukseflux SR11, que está situado na parte superior do primeiro protótipo do projecto, como se pode ver no lado esquerdo da Figura 3.1. O piranómetro encontra-se na posição paralela à fachada do edifício medindo exactamente a irradiância que atinge perpendicularmente o módulo fotovoltaico.



Figura 3.1 - Piranómetro

Por o sistema estar encastrado na parede do edifício, e existir uma parte da fachada que está um pouco à frente do mesmo, em algumas partes do dia, como de manhã e à tarde, quando o sol se situa muito a Este ou muito a Oeste, uma parte do PV fica à sombra, como se pode ver na Figura 3.2.

Este fenómeno vai-se repercutir principalmente na componente eléctrica do sistema, como se verá na análise experimental (capítulo 4), pois a sombra afecta a produção eléctrica do PV.



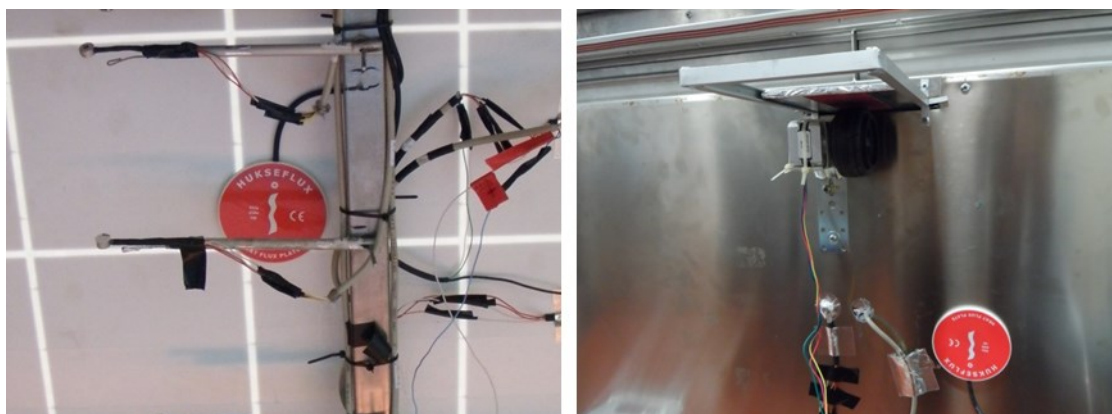
**Figura 3.2 – Sombreamento no módulo fotovoltaico**

O facto de uma parte do módulo fotovoltaico estar à sombra faz com que a eficiência do mesmo diminua significativamente, devido ao efeito de sombreamento. Se a sombra fosse tapando as filas de células, o efeito talvez não fosse muito elevado porque seria minimizado pelos díodos bypass. No entanto como a sombra é feita ao longo das colunas de células esse efeito acentua-se [18].

### **3.1.2 Fluxo convectivo de calor**

Em alguns casos, considerou-se relevante conhecer o fluxo de calor que atravessa as superfícies integrantes do protótipo. Esses casos são, a superfície do PV, e o isolamento entre a bateria e a sala, de forma a conhecer a energia que passa do PV para a cavidade de ar, e a energia que passa da bateria térmica para a sala.

Para medir o fluxo utilizaram-se dois fluxímetros Hukseflux HFP01-05. As Figura 3.3 mostram os dois fluxímetros instalados.



**Figura 3.3 – Fluxímetros**

As constantes dos fluxímetros estão indicadas na Quadro 3.1.

Nome do Fluxímetro	Constante ( $\frac{W}{m^2}$ )
$F_{PV}$	$62,52 \cdot 10^{-6}$
$F_{Batsala}$	$62,71 \cdot 10^{-6}$

Quadro 3.1 – Constantes de calibração dos fluxímetros

### 3.1.3 Corrente e tensão

De forma a conhecer a potência gerada no PV, mediu-se simultaneamente a corrente e a tensão imposta pelo mesmo. A tensão foi medida directamente pelo Agilent aos terminais positivo e negativo do PV, já a corrente foi medida com recurso a um shunt (Figura 3.4), no qual 100mV correspondem a 10A.



Figura 3.4 – Shunt

Uma vez que o PV do sistema está ligado em série com o PV do primeiro protótipo do projecto, é inevitável que a corrente seja igual em ambos. No entanto, a tensão em cada um dos mesmos varia. Assim a tensão do PV do sistema em estudo foi medida aos terminais apenas desse PV e não do conjunto dos dois módulos.

### 3.1.4 Temperatura

A temperatura é uma das medidas mais importantes deste estudo. É nas temperaturas medidas que se baseiam a maioria dos cálculos e das conclusões efectuadas na análise dos resultados.



Utilizaram-se sensores de temperatura PT100, que foram colocados em vários locais, nomeadamente no PV, na cavidade de ar, no PCM, no interior da sala, no exterior do edifício entre outros. (Figura 3.5; Figura 3.6; Figura 3.7; Figura 3.8)



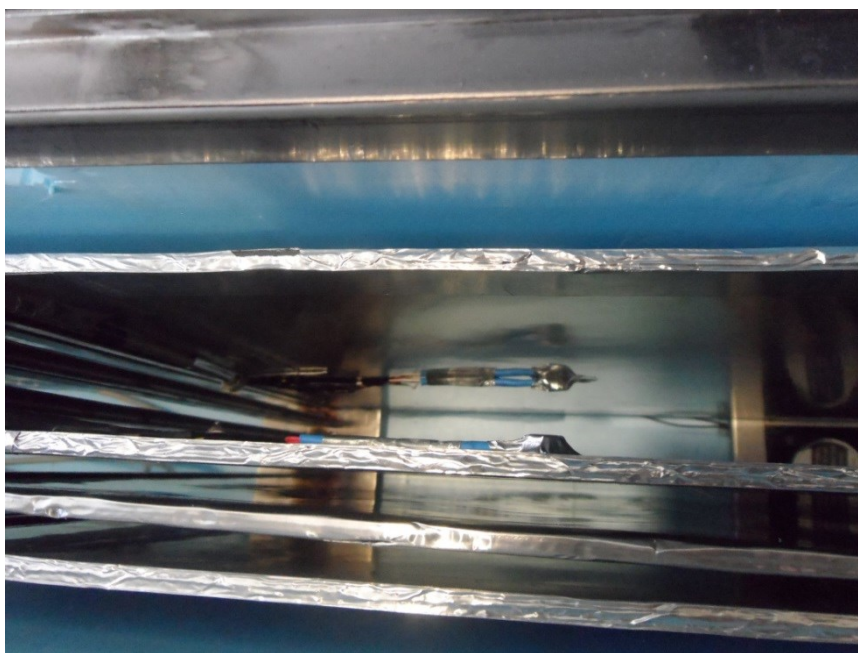
**Figura 3.5 – Cablagem utilizada nos sensores de temperatura**



**Figura 3.6 – Sensores de temperatura da cavidade de ar**



**Figura 3.7 – Sensor de temperatura à saída da bateria térmica**



**Figura 3.8 – Sensores de temperatura no PCM**

A distribuição dos sensores pode ser visualizada no mapa de sensores que será mostrado de seguida.

### **3.1.5 Mapa de sensores**

O mapa de sensores é ilustrado na Figura 3.9, acompanhado do Quadro 3.2 que indica o tipo de sensor, o nome dado ao sensor e o canal em que está ligado no Agilent, bem como a legenda da simbologia utilizada para cada tipo de sensor.

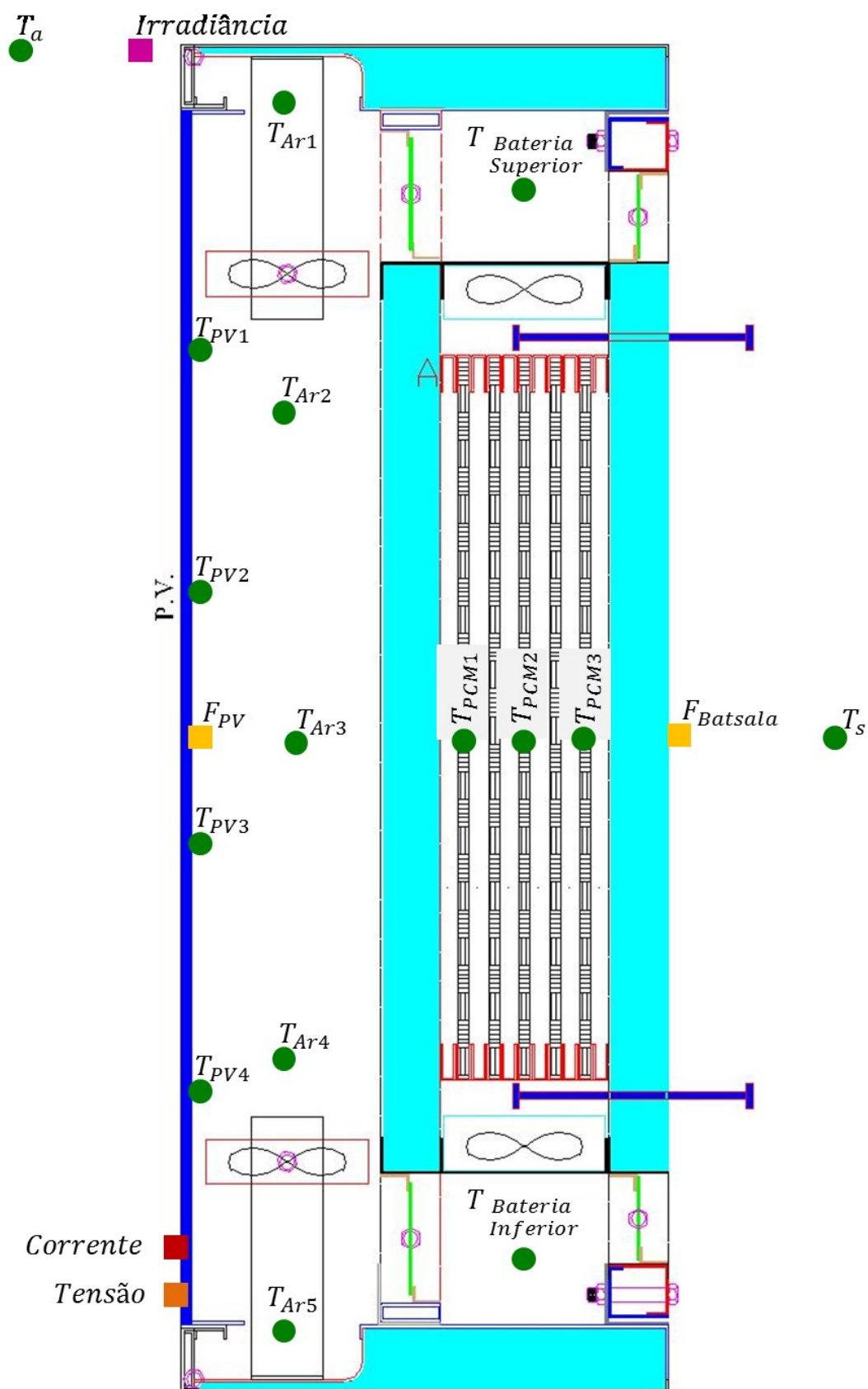







Figura 3.9 – Mapa de sensores

Tipo de sensor	Símbolo	Nome	Canal	Designação
Piranómetro		<i>Irradiância</i>	101	Irradiância
Fluxímetro		$F_{PV}$	102	Fluxo através do PV
		$F_{Batsala}$	103	Fluxo da bateria para a sala
Shunt		<i>Corrente</i>	107	Corrente do PV
Voltímetro		<i>Tensão</i>	106	Tensão do PV
PT100		$T_s$	205	Temperatura da sala
		$T_{Ar1}$	201	Temperaturas na cavidade de ar
		$T_{Ar2}$	202	
		$T_{Ar3}$	110	
		$T_{Ar4}$	208	
		$T_{Ar5}$	303	
		$T_{PV1}$	301	Temperaturas no PV
		$T_{PV2}$	204	
		$T_{PV3}$	108	
		$T_{PV4}$	206	
		$T_{PCM1}$	308	Temperaturas no PCM
		$T_{PCM2}$	307	
		$T_{PCM3}$	309	
		$T_{Bateria Superior}$	304	Temperatura na parte exterior superior da bateria
		$T_{Bateria Inferior}$	207	Temperatura na parte exterior inferior da bateria
		$T_a$	208 (SOLAR XXI)	Temperatura ambiente exterior

Quadro 3.2 – Legenda do mapa de sensores



## 3.2 Processos de cálculo de transferência de calor e electricidade

### 3.2.1 Irradiância

A irradiância é medida pelo piranómetro em  $\frac{W}{m^2}$ , sendo posteriormente multiplicada pela área do protótipo ou do PV. Por questões de análise experimental são calculados dois indicadores referentes à irradiância. O primeiro é a irradiância que incide em toda a parte frontal do protótipo ( $\dot{G}_D$ ) e que é utilizada para o cálculo da eficiência global e térmica, o segundo é a irradiância que chega apenas ao PV ( $\dot{G}_{D\ PV}$ ) e é utilizada para o cálculo da eficiência eléctrica. Esta decisão prende-se no facto de o PV não perfazer toda a área frontal do sistema.

$$\dot{G}_D[W] = Irradiância \left[ \frac{W}{m^2} \right] * A_T[m^2]$$

$$\dot{G}_{D\ PV}[W] = Irradiância \left[ \frac{W}{m^2} \right] * A_{PV}[m^2]$$

Em que  $A_T$ , é a área total da parte frontal do protótipo e é dada por:

$$A_T[m^2] = 1,68[m] * 0,74[m]$$

E  $A_{PV}$ , é a área do PV, e é dada por:

$$A_{PV}[m^2] = 1,48[m] * 0,65[m]$$

### 3.2.2 Módulo fotovoltaico

A potência produzida pelo módulo fotovoltaico é calculada a partir dos sensores “Corrente” e “Tensão” e é dada pela expressão:

$$\dot{P}_{PV}[W] = Corrente [A] * Tensão [V]$$

### 3.2.3 Ventiladores

A potência consumida pelos ventiladores depende do grupo de ventiladores que está a ser utilizado, uma vez que existem dois grupos de ventiladores:

Grupo de ventiladores	$\dot{P}_{Ventiladores}$ [W]
Cavidade de ar	21,6
Bateria térmica	43,2

Quadro 3.3 – Potência dos ventiladores

A energia consumida pelos ventiladores, uma vez que se considera ser sempre constante, é calculada segundo a expressão:

$$P_{Ventiladores}[kJ] = \frac{P_{Ventiladores}[W] * \Delta t[s]}{1000}$$

### 3.2.4 Calor transmitido por fluxo condutivo e convectivo

O calor transmitido por fluxo condutivo através do PV e do isolamento da bateria é medido nos fluxímetros em  $\frac{W}{m^2}$ , sendo posteriormente multiplicado pela área correspondente.

O fluxo que passa do módulo fotovoltaico para a cavidade de ar é dado pela expressão:

$$Q_{PVAr}[W] = F_{PV} \left[ \frac{W}{m^2} \right] * A_{PV}[m^2]$$

O fluxo que passa da bateria térmica para a sala é dado pela expressão:

$$Q_{BatSala}[W] = F_{Batsala} \left[ \frac{W}{m^2} \right] * A_{Isolamento}[m^2]$$

Em que  $A_{PV}$ , é a área do PV e é dada por:

$$A_{PV}[m^2] = 1,48[m] * 0,65[m]$$

E  $A_{Isolamento}$ , é a área da superfície, composta por isolamento térmico, que faz fronteira entre a bateria térmica e a sala, e é dada por:

$$A_{Isolamento}[m^2] = 1,615[m] * 0,505[m]$$

### 3.2.5 Calor transmitido por ventilação

O calor transmitido por ventilação é calculado com base nas temperaturas de entrada e saída do ar, que para os cálculos efectuados na análise experimental foram sempre  $T_{BateriaInferior}$  e  $T_{BateriaSuperior}$ , uma vez que só se utilizou este método de cálculo para o Modo 2 e 3.

O calor transmitido através da ventilação ( $\dot{Q}_V$ ) é calculado com base na expressão:

$$\dot{Q}_V[W] = \dot{m} \left[ \frac{kg}{s} \right] * C_p \left[ \frac{kJ}{kg.C^\circ} \right] * (T_{BateriaSuperior} - T_{BateriaInferior})[C^\circ]$$

Em que o  $C_p(Ar 30C^\circ) = 1,013$  [19] e o caudal varia consoante o modo de funcionamento (Quadro 3.4).

Modo de funcionamento	$\dot{m} \left[ \frac{kg}{s} \right]$
Modo de funcionamento 2	0,0278
Modo de funcionamento 3	0,0252

Quadro 3.4 – Caudal nos Modos de funcionamento 2 e 3

O caudal foi calculado com base na velocidade média do escoamento à saída do protótipo.

### 3.2.6 Cálculo integral das potências

Ao longo da análise experimental (capítulo 4) serão sempre efectuadas dois tipos de análise, uma análise instantânea em que se consegue perceber o comportamento de cada modo de funcionamento ao longo do tempo, e uma análise energética, com base no integral dos valores instantâneos, obtendo assim valores, por exemplo de eficiência, para certos períodos de tempo.

Nos subcapítulos anteriores indicou-se como se calcularam as potências relevantes utilizadas na análise instantânea. No presente subcapítulo demonstrar-se-á como se calcularam as energias utilizadas na análise energética.

Para fazer a análise energética, as potências calculadas anteriormente têm que ser integradas.

Para integrar os valores das potências calculadas nos subcapítulos anteriores, utilizou-se o método de Simpson [20]. O método de Simpson, com base em três pontos dados (o ponto a, o ponto b, e um ponto médio entre estes), faz uma aproximação a um polinómio de 2º grau (ou a uma recta se for caso disso) e calcula o integral abaixo desse polinómio, como se pode entender pela Figura 3.10.

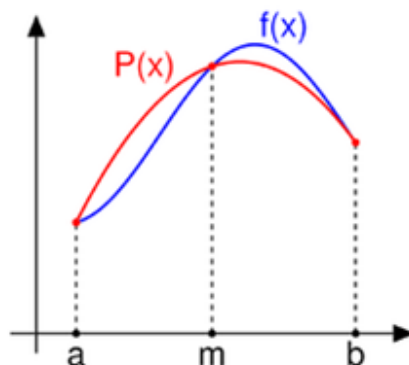


Figura 3.10 – Método de Simpson [20]

A expressão do método de Simpson é a seguinte:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \int_a^b P(x)dx = \frac{b-a}{6} * \left[ f(a) + 4 * f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right]$$

Em que  $f(x)$  é a curva real, e  $P(x)$  é a aproximação pelo método de Simpson.

Neste caso específico entre o ponto a e b existe um intervalo de 10 minutos, visto que entre cada medida existe um intervalo de 5 minutos.

### 3.2.7 Calor armazenado no PCM

Como já apresentado no subcapítulo 2.2.3 é conhecido o comportamento do PCM através da curva T-Q (Figura 3.11 – Curva, que nos dá informação do calor armazenado no PCM a uma certa temperatura.

Através da temperatura medida no PCM, é possível calcular a energia armazenada no mesmo num certo instante. Assim, se calcularmos a energia armazenada em dois instantes diferentes, através da diferença entre esses valores é possível perceber quanta energia foi perdida ou ganha.

Através dos dados fornecidos pela análise do PCM em [17], foi possível traçar-se no *Excel* uma curva de aproximação ao gráfico. (Figura 3.11)

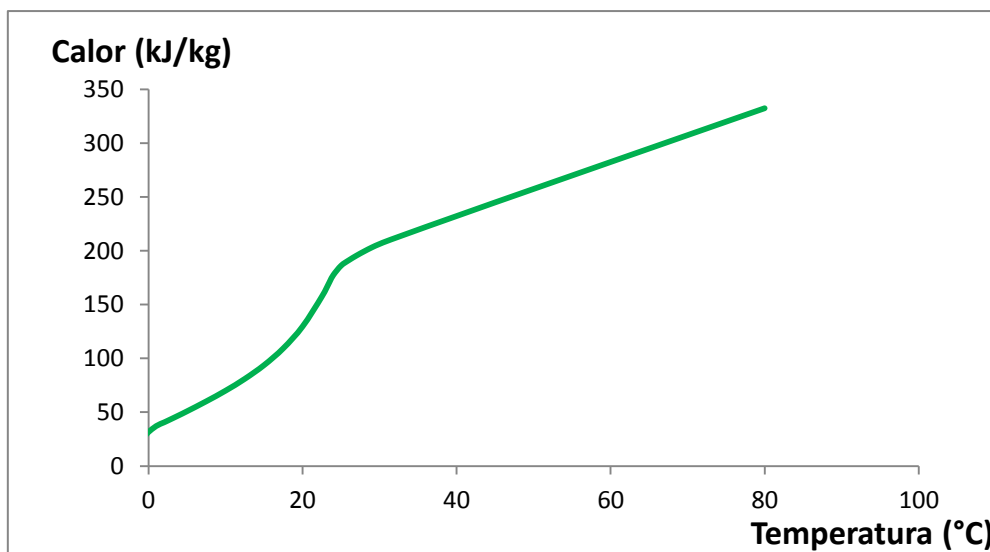


Figura 3.11 – Curva T-Q

Neste caso específico surgiu a necessidade de dividir a curva em quatro partes (Figura 3.12), pois o ajuste à curva na sua totalidade possuía uma variância não muito próxima de um, ou por outras palavras o ajuste que o Excel estaria a fazer tinha um erro associado significativo.

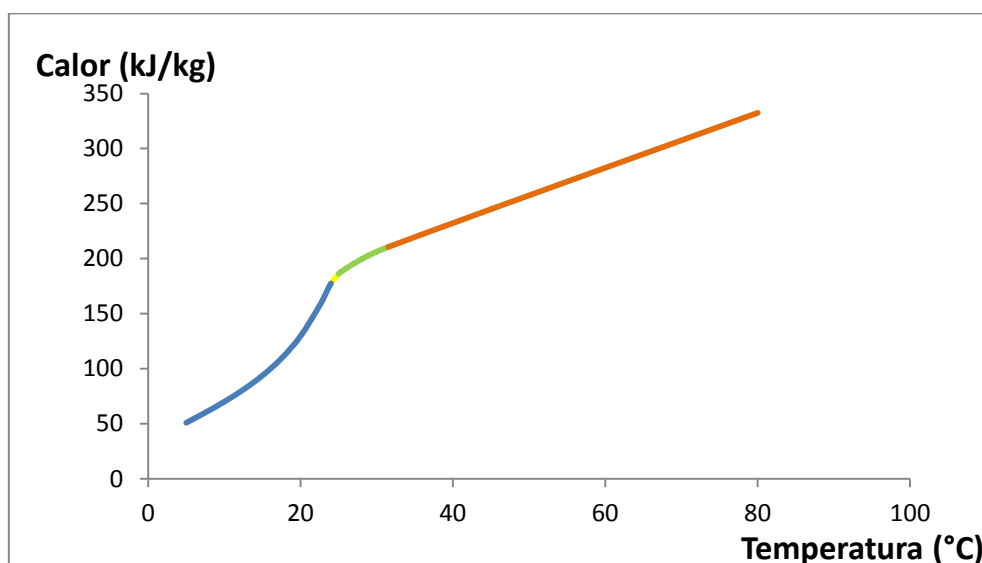


Figura 3.12 – Subdivisão da curva T-Q

Dessa forma, e como referido anteriormente, a curva foi dividida em quatro partes (Figura 3.13, Figura 3.14, Figura 3.15 e Figura 3.16), e a cada uma das partes foi feito um ajuste individual, obtendo-se assim uma variância do ajuste igual a um ou muito próxima de um. Através do polinómio resultante de cada uma das partes, calcula-se a energia no PCM, utilizando o polinómio correspondente à temperatura em causa.

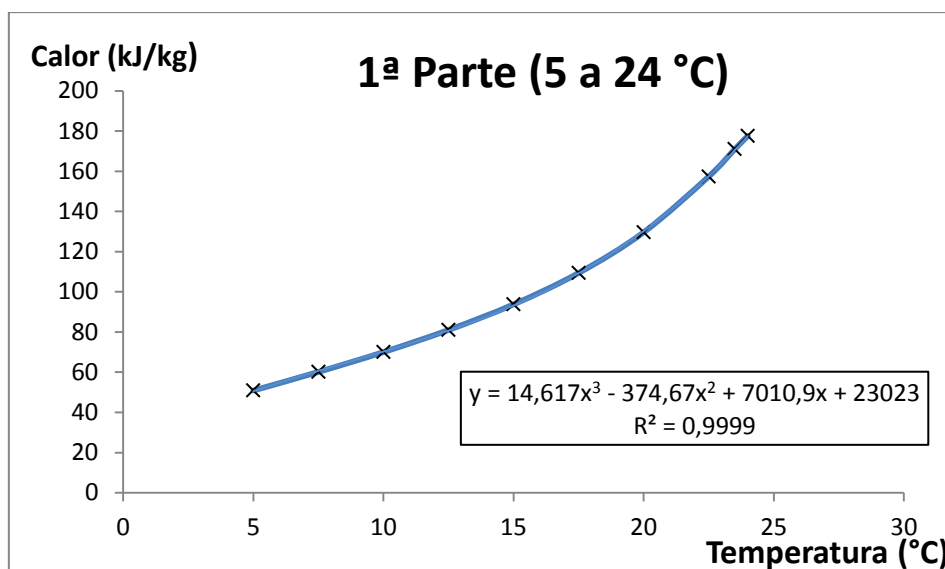


Figura 3.13 – 1ª parte da curva T-Q

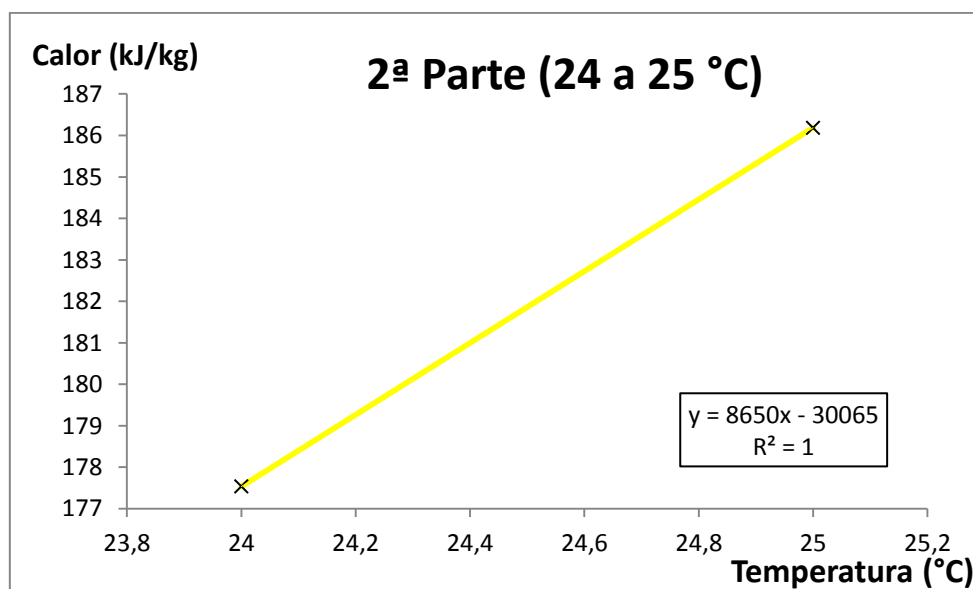


Figura 3.14 – 2ª parte da curva T-Q

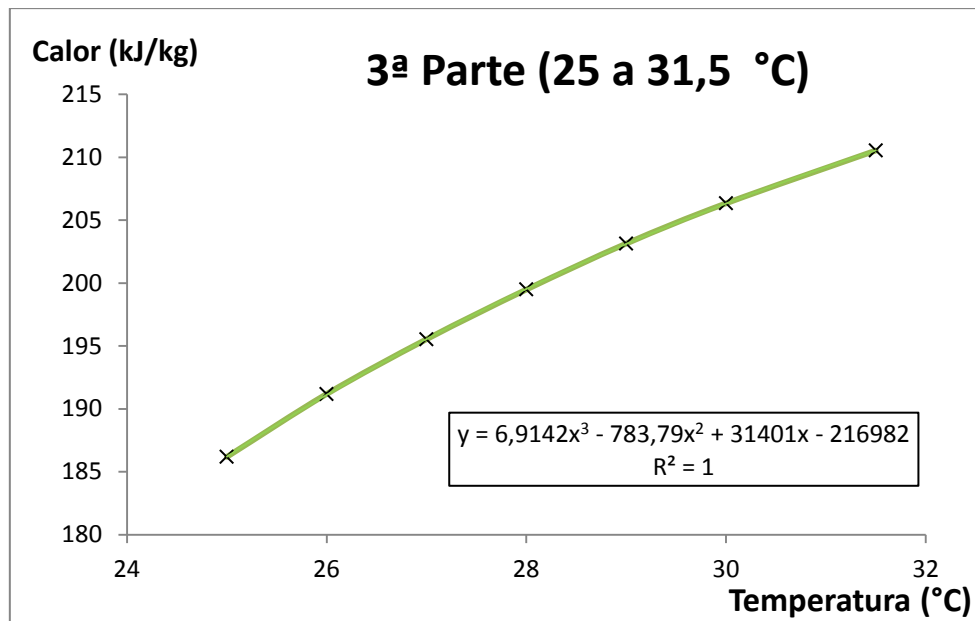


Figura 3.15 – 3ª parte da curva T-Q

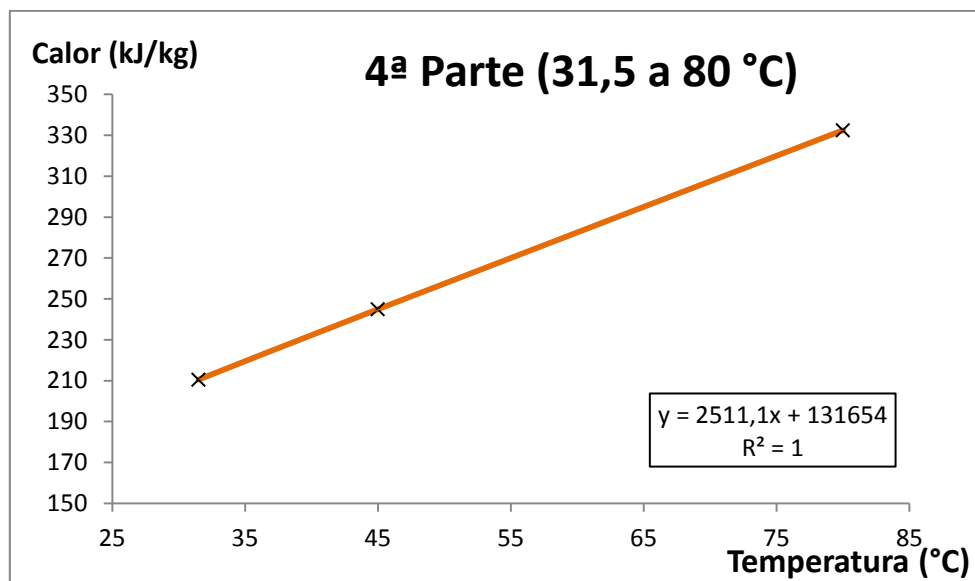


Figura 3.16 – 4ª parte da curva T-Q

Desta forma o erro associado ao cálculo da energia armazenada no PCM é no máximo de 0,9%.

A análise da energia armazenada no PCM tem sempre que ser feita entre um valor de temperatura inicial e um valor de temperatura final.

Para auxiliar a análise de vários períodos de carregamento ou descarregamento da bateria térmica foi portanto criado um calculador de energia no PCM que se baseia nas quatro regressões que foram obtidas anteriormente:

$$\begin{cases} Q1 = 16,617 T^3 - 374,67 T^2 + 7010,9 T + 23023 & 5 < T < 24 \\ Q2 = 8650 T - 30065 & 24 < T < 25 \\ Q3 = 6,9142 T^3 - 783,79 T^2 + 31401 T - 216982 & 25 < T < 31,5 \\ Q4 = 2511,1 T + 131654 & 31,5 < T < 80 \end{cases}$$

Basicamente o que o calculador faz é calcular parcialmente a quantidade de energia referente a cada uma das partes e posteriormente somá-las. Para além disso tem que se indicar a massa do PCM, pois as equações estão em kJ/kg.

Por exemplo na Figura 3.17, pretendeu-se calcular a energia armazenada no PCM tendo em conta que inicialmente ele estava a 5 °C e que no fim ficou a 45 °C. O PCM no protótipo em estudo tem uma massa de 16,9 kg.

Peso (Kg)	16,9						
1ª Parte [5 a 24] °C		2ª Parte [24 a 25] °C		3ª Parte [25 a 31,5] °C		3ª Parte [31,5 a 80] °C	
T1	5	T1	24	T1	25	T1	31,5
T2	24	T2	25	T2	31,5	T2	45
Q1Parte (kJ)	127,0	Q2Parte (kJ)	8,7	Q3Parte (kJ)	24,3	Q3Parte (kJ)	33,9
Qtotal (kJ)							
3276,9							

Figura 3.17 – Exemplo do calculador de energia armazenada no PCM

### 3.2.8 Cálculo da potência da bateria de PCM

Ao contrário de todos os subcapítulos anteriores, em que primeiramente se calculou a potência, e só depois se integrou de forma a obter a energia, no caso do PCM primeiro obtém-se a energia entre dois pontos e só depois se divide pelo tempo entre esses dois pontos, que neste caso são 5 minutos, obtendo assim uma potência média.

Sendo assim a potência média libertada ou absorvida pelo PCM é dada por:

$$\dot{Q}_{PCM}[W] = \frac{Q_{PCM(t=0)}[kJ] - Q_{PCM(t=5)}[kJ]}{5[min] * 60[s]}$$

## 4. Análise Experimental BIPV/T – PCM

### 4.1 Introdução e descrição da análise

O presente trabalho baseou-se particularmente no estudo experimental ao conceito proposto. Desta forma, este capítulo debate a parte mais relevante do trabalho, abrangendo a análise dos dados recolhidos e a sua interpretação.

Como foi já descrito, o sistema em causa é um sistema dinâmico que se baseia em vários modos de funcionamento tentando com isso fazer a melhor gestão da energia. Ao longo desta análise cada um desses modos de funcionamento é analisado isoladamente, durante o período em que esteve activo. Foram efectuados dois tipos de análise: uma análise instantânea com o intuito de perceber, progressivamente, o comportamento de cada modo de funcionamento; e uma análise energética que analisa o modo de funcionamento no seu todo com base nas quantidades de energia.

No entanto, o objectivo do trabalho é analisar não só os modos de funcionamento, mas também o funcionamento do sistema no seu todo. Assim sendo, efectuou-se também uma análise energética englobando a totalidade do dia, para os dias em análise.

Como referido anteriormente, embora não se possa definir que este sistema tenha um funcionamento para inverno e outro para o verão, uma vez que se baseia nas condições da envolvente e não na estação do ano, é óbvio que as estações do ano impõem certas condições específicas às quais correspondem modos de funcionamento. Sendo assim podemos dizer que existem modos de funcionamento específicos para inverno e modos de funcionamento específicos para verão. Estes modos de funcionamento são agrupados ao longo dos dias segundo o princípio de funcionamento explícito no subcapítulo 2.3. A esse agrupamento de modos chamou-se Regime.

Na análise experimental do sistema, foram então previstos cinco Regimes, os Regimes de Inverno 1 e 2, e os Regimes de Verão 1, 2 e 3 (Figura 4.1).

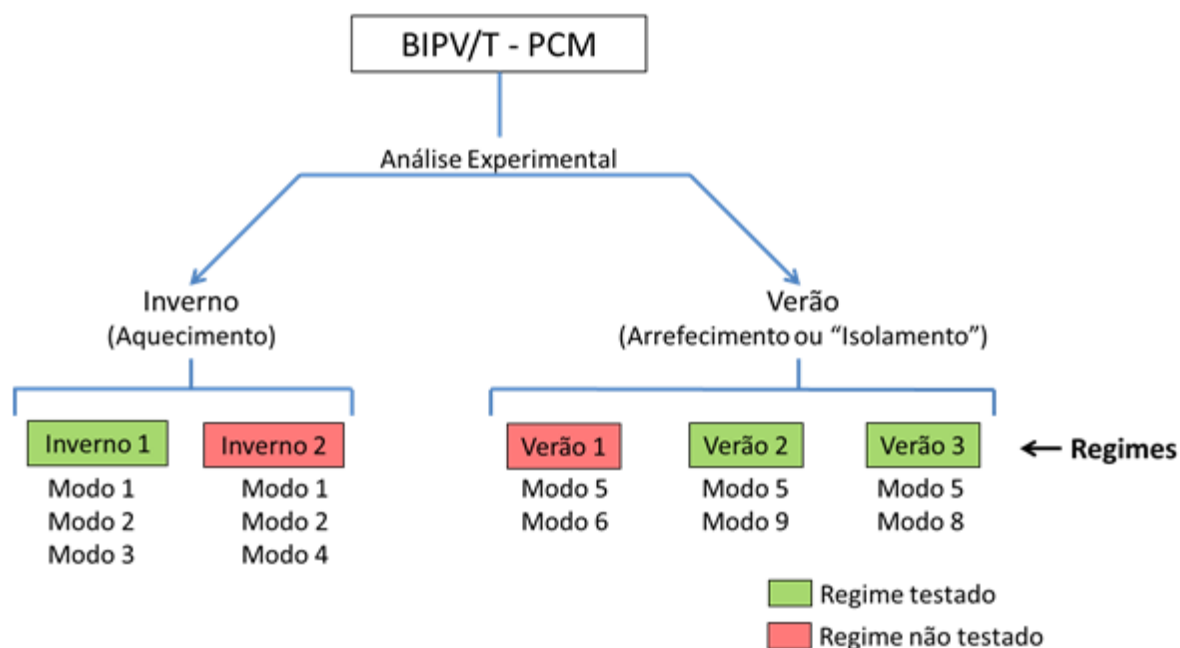


Figura 4.1 – Diagrama representativo dos regimes previstos para teste



Dos regimes previstos foram testados o Regime de Inverno 1 e os Regimes de Verão 2 e 3. O Regime de Inverno 2 não foi testado por não ter havido tempo suficiente, ainda durante as condições de inverno, sendo que se prevê testá-lo em trabalhos futuros. O Regime de Verão 1 não foi testado, por se ter entendido, durante a análise dos resultados do período de inverno, que o fundamento por trás desse regime não funcionaria devido à incapacidade de isolamento térmico entre a cavidade de ar e a bateria térmica. Este facto foi já explicado no subcapítulo 2.3.6.

## 4.2 Período de ensaio e descrição das condições climáticas

A temperatura ambiente média diária e a irradiância média diária no período de inverno são mostradas respectivamente na Figura 4.2 e na Figura 4.3. Em ambas as figuras, está representado com um círculo o período no qual o sistema foi testado.

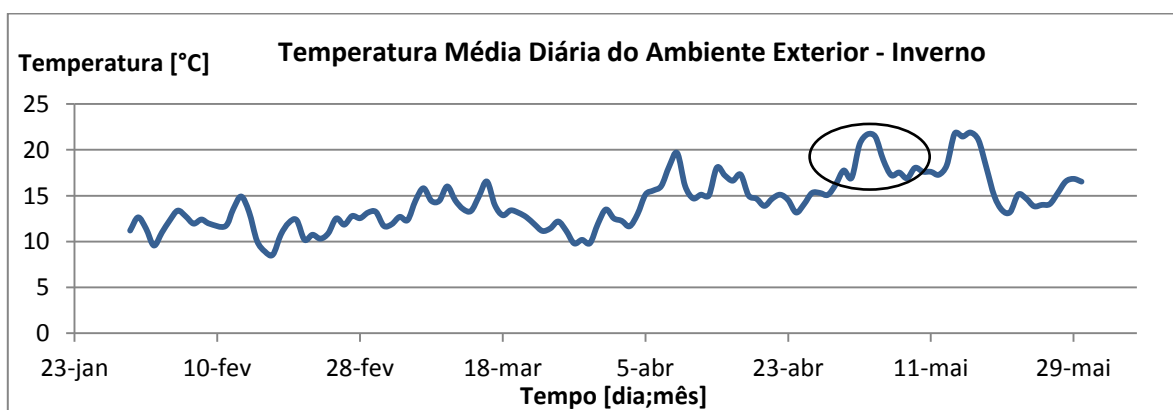


Figura 4.2 – Temperatura média diária do ambiente exterior no período de inverno

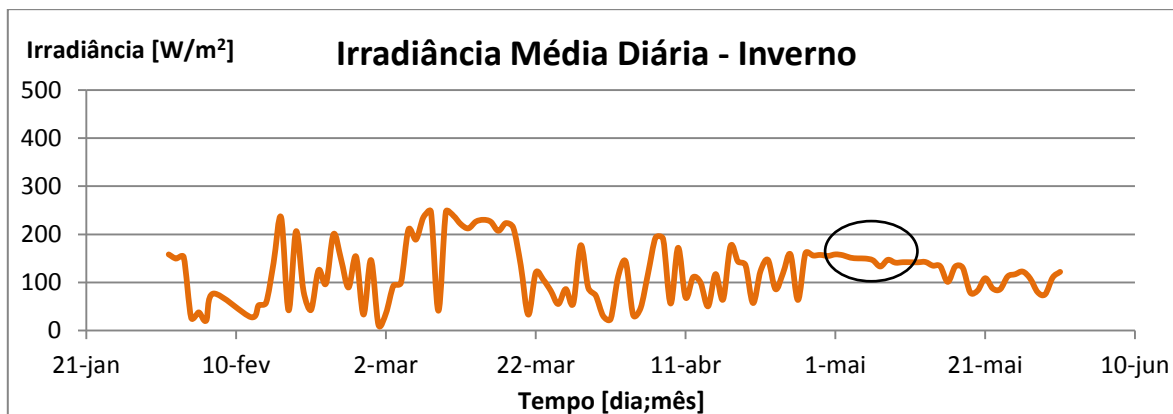
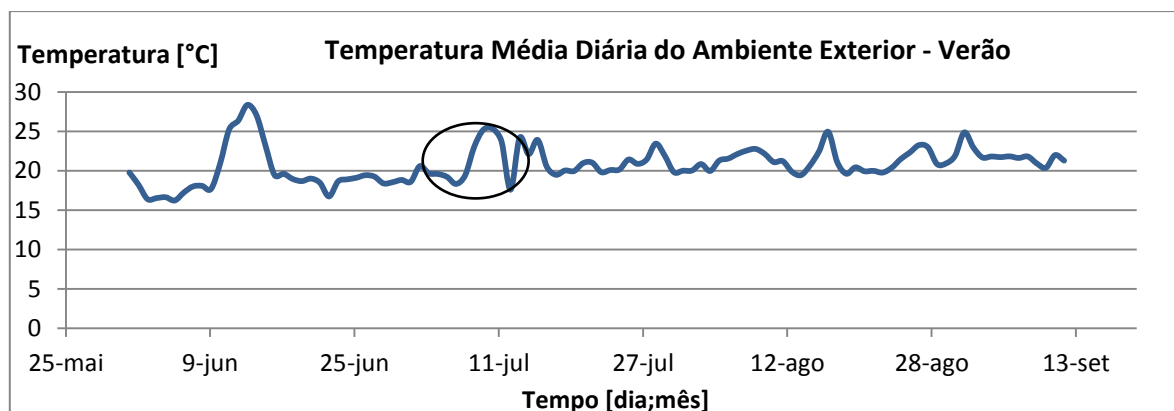


Figura 4.3 – Irradiância média diária no período de Inverno

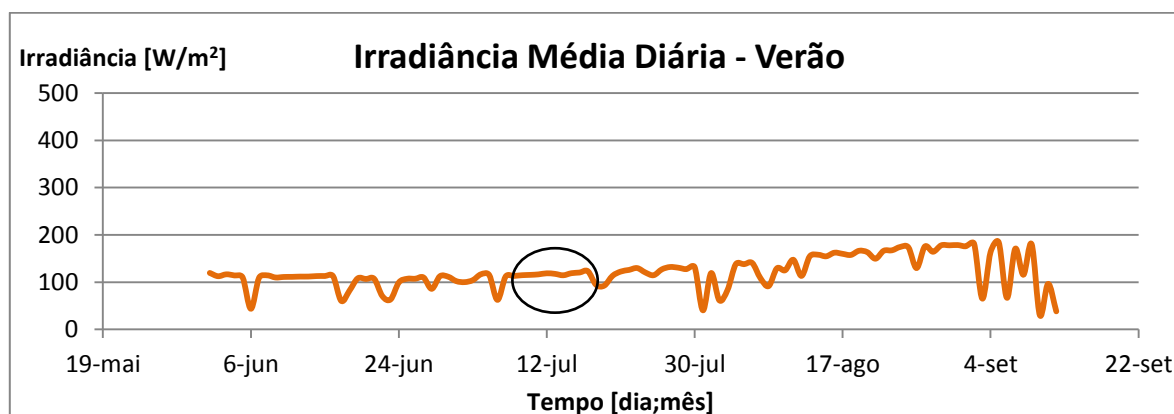
O Regime de Inverno 1 foi testado no dia 5 de Maio, caracterizado com uma temperatura média ambiente próxima dos 20 °C e uma irradiância média de 150 W/m<sup>2</sup>. A temperatura média em dias de céu limpo no período mais característico de inverno (Fevereiro e Março) apenas atinge cerca de 15 °C, e uma irradiância média de 250 W/m<sup>2</sup>. As condições nas quais se pôde testar o sistema com o regime de inverno (5 de Maio) diferem desse período em 5 °C na temperatura ambiente e em 100 W/m<sup>2</sup> na irradiância média.

Apenas foi possível testar o sistema na data referida porque por razões técnicas este não se encontrava a funcionar integralmente, por o PV não estar ainda ligado. No entanto, uma vez que no período testado a irradiância foi inferior à que seria no período característico de inverno (Fevereiro e Março) presume-se que uma maior irradiância levará a um melhor desempenho do sistema.

A temperatura ambiente e a irradiância no período de verão são expostas respectivamente na Figura 4.4 e na Figura 4.5.



**Figura 4.4 – Temperatura média diária do ambiente exterior no período de verão**



**Figura 4.5 – Irradiância média diária no período de verão**

O Regime de Verão 1 e o Regime de Verão 2 foram testados respectivamente nos dias 10 e 11 de Julho. A temperatura média ambiente foi próxima de 25 °C e a irradiância média próxima de 120 W/m<sup>2</sup>.

Na Figura 4.6 é ilustrado o comportamento da irradiância ao longo de um dos dias analisados. Notou-se que a intensidade da irradiância em dois pontos ao longo do dia se alterava drasticamente num curto espaço de tempo, alterando-se dos 115 para os 270 W/m<sup>2</sup>. Este facto deve-se a fenómenos de sombreamento do sistema (subcapítulo 3.1.1), por parte do edifício, nos períodos próximos do nascer do sol e pôr-do-sol.

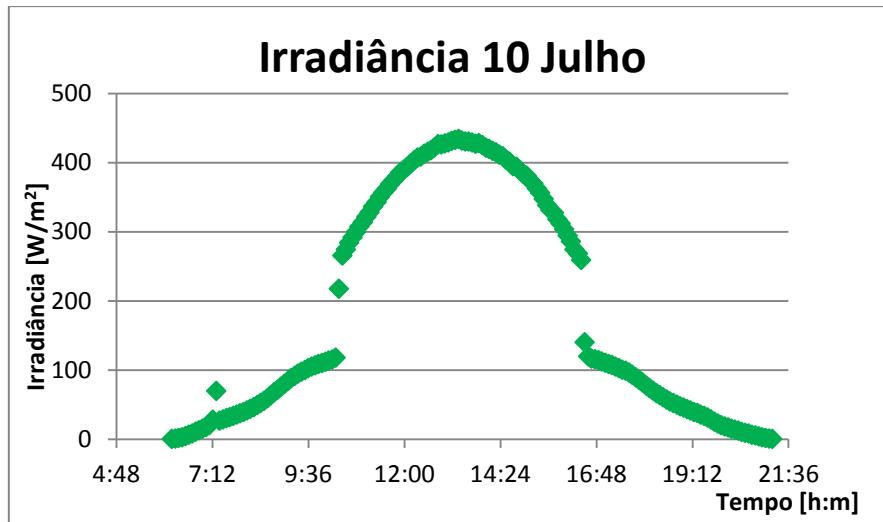


Figura 4.6 – Irradiância solar, dia 10 de Julho

Assim, optou-se por analisar apenas o período de tempo no qual a irradiância é superior a  $280 \frac{W}{m^2}$ , salvaguardando assim comportamentos invulgares por parte das eficiências calculadas devido a esta variação repentina da irradiância.

Embora se tenha apresentado apenas o gráfico referente a um dos dias analisados, é de referir que os outros dias em análise apresentam o mesmo comportamento.

### 4.3 Balanço energético do sistema

A análise experimental do sistema, e de cada um dos modos, foi baseada no balanço energético do mesmo (Figura 4.7). Para tal, definiu-se um volume de controlo, que é representado pelo tracejado vermelho, e que envolve todo o protótipo em estudo. É deste balanço energético que provêm, e são fundamentadas, as fórmulas de cálculo da eficiência dos modos de funcionamento e do sistema no geral.

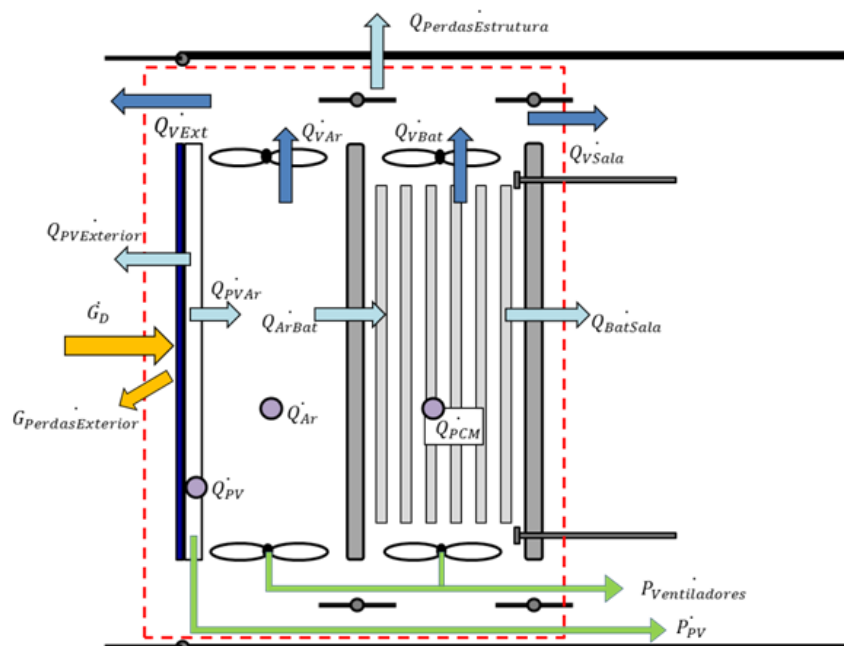







Figura 4.7 – Balanço energético do sistema

	Potência sob a forma de radiação
	Potência sob a forma de electricidade
	Potência sob a forma de calor transmitida por fluxo condutivo e convectivo
	Potência sob a forma de calor transmitida por convecção forçada (Ventilação)
	Potência absorvida
$\dot{G}_D$	Irradiância normal incidente na parte frontal do sistema
$\dot{G}_{PerdasExterior}$	Perdas para o exterior sob a forma de radiação
$\dot{Q}_{PerdasEstrutura}$	Perdas para a parede onde está colocado o protótipo sob a forma de calor
$\dot{Q}_{PVAr}$	Potência sob a forma de calor transmitido entre o PV e a Cavity de Ar
$\dot{Q}_{PVExterior}$	Potência sob a forma de calor transmitido entre o PV e o Exterior
$\dot{Q}_{ArBat}$	Potência sob a forma de calor transmitido entre a cavity de ar e a Bateria Térmica
$\dot{Q}_{BatSala}$	Potência sob a forma de calor transmitido entre a Bateria Térmica e a Sala
$\dot{Q}_{VExt}$	Potência sob a forma de calor transmitido por convecção forçada para o Exterior
$\dot{Q}_{VAr}$	Potência sob a forma de calor transmitido por convecção forçada de, ou para, a Cavity de Ar
$\dot{Q}_{VSala}$	Potência sob a forma de calor transmitido por convecção forçada de, ou para, a Sala
$\dot{P}_{Ventiladores}$	Potência consumida pelos ventiladores
$\dot{P}_{PV}$	Potência produzida pelo PV
$\dot{Q}_{PV}$	Potência absorvida no PV
$\dot{Q}_{Ar}$	Potência absorvida no Ar
$\dot{Q}_{PCM}$	Potência absorvida no PCM

**Quadro 4.1 – Legenda do balanço energético**

Foram definidos cinco tipos de indicadores energéticos, quatro de transferência de energia (sob a forma de radiação; electricidade; calor por fluxo condutivo/convectivo; e calor por convecção forçada), e um de absorção de energia, e que são representados por setas/circulo, como é possível entender através da legenda da figura (Quadro 4.1).

## 4.4 Resultados experimentais de Inverno

O período de inverno foi analisado a partir de dados do dia 5 de Maio, segundo o seguinte calendário:

Modo de funcionamento	Período Horário
<b>Modo 7</b> – Inactivo Inverno	20:00h (dia 4) → 10:24h (dia 5)
<b>Modo 2</b> – Aquecimento da sala a partir do PV	10:24h → 13:59h
<b>Modo 1</b> – Carregamento do PCM a partir do PV	14:04h → 18:20h
(Modo 1 s/descarregamento da bateria)	14:04h → 16:07h
<b>Modo 3</b> – Aquecimento da sala a partir do PCM	18:25h → 20:00h

Quadro 4.2 – Calendário de experimentação de inverno

Para fazer a análise do sistema durante um dia completo iniciou-se a análise no dia 4 às 20h e finalizou-se no dia 5 à mesma hora.

No Modo de funcionamento 1 optou-se por analisar simultaneamente o período total no qual foi testado o Modo 1 e um período reduzido deste modo no qual a eficiência foi sempre positiva, uma vez que se verificou que o sistema carregou o PCM até às 16:07h, no entanto, após esse período começou a descarregar o PCM. Este facto aconteceu devido à operação do sistema ser feita manualmente, como será descrito e explicado mais à frente no subcapítulo 4.4.2.

### 4.4.1 Modo 2 – Aquecimento da sala a partir do PV

#### 4.4.1.1 Análise Instantânea

O Modo 2 tem por objectivo o aquecimento da sala, através da transmissão de calor directamente do PV para a sala. Na Figura 4.8, estão representadas algumas temperaturas relevantes respeitantes a esse modo de funcionamento. A legenda referente aos nomes dos sensores é apresentada no subcapítulo 3.1.5.

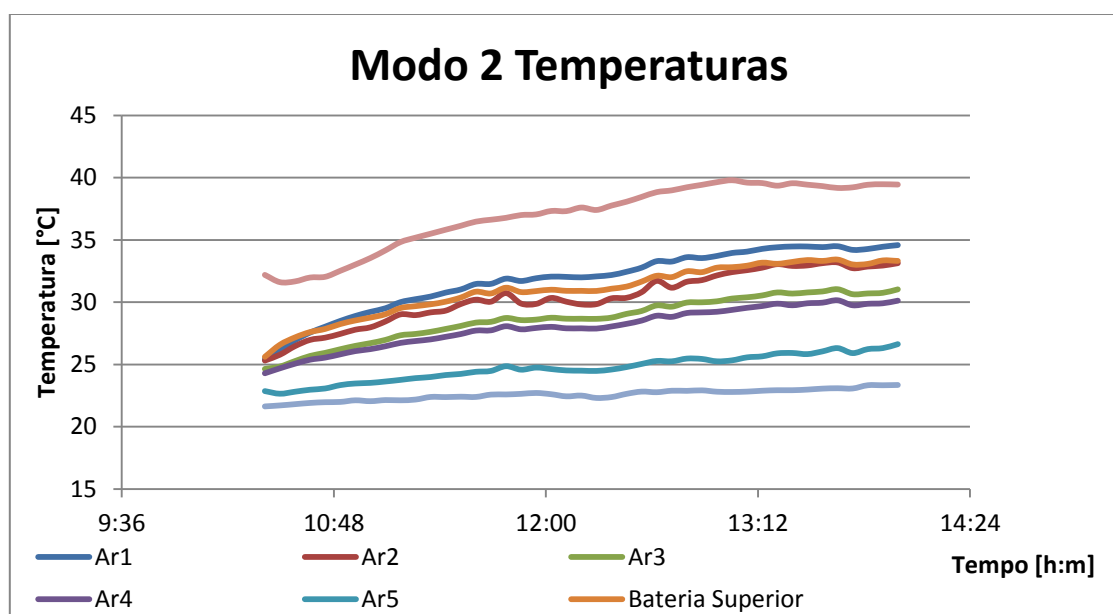


Figura 4.8 – Temperaturas, Modo 2

As temperaturas lidas nos quatros sensores colocados no PV mostravam valores semelhantes, dessa forma optou-se por colocar apenas a média desses valores.

O ar flui a partir da sala entrando no protótipo (sensor “Bateria inferior”), passando pela cavidade de ar (“Ar5”, “Ar4”, “Ar3”, “Ar2” e “Ar1”) onde retira energia do PV e consequentemente aumentando a temperatura do ar, acabando posteriormente por sair do sistema (“Bateria Superior”).

A temperatura do ar durante a permuta de calor deve aumentar gradualmente entre o ponto do sensor da “Bateria inferior” até ao sensor da “Bateria superior” uma vez que o ar vai retirando calor da fonte quente, o PV. Isto acontece de facto ao longo da primeira parte do PV, no entanto é de notar que a temperatura na “Bateria superior” é inferior à temperatura no “Ar1”. A Figura 4.9 ilustra de forma intuitiva esse fenómeno.

Os valores de temperaturas utilizados são uma média das temperaturas em cada sensor, calculadas durante o intervalo de tempo em que o Modo 2 funcionou.

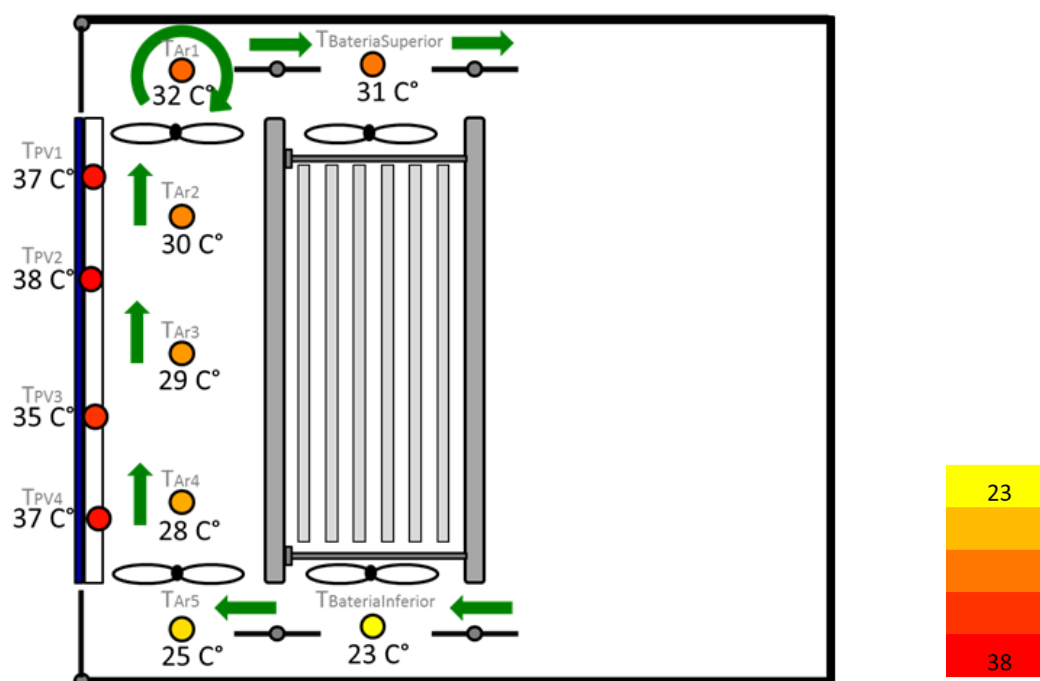


Figura 4.9 – Esquema gráfico de temperaturas, Modo 2

Este fenómeno deve-se ao facto de, na zona superior da cavidade de ar, onde o ar deve passar para a sala, existir uma cavidade que oferece alguma perda de carga, criando provavelmente uma acumulação de ar, ou um vórtice e circulação, fazendo isso com que a temperatura nesse local aumente e se acumule lá energia. A forma do protótipo que induz essa acumulação ou recirculação de ar pode ver-se na figura que ilustra o mapa de sensores, situada no subcapítulo 3.1.5.

É de notar também que o maior salto da temperatura do ar na cavidade de ar, é dado do sensor “Ar5” para o sensor “Ar4”, isso porque é onde a diferença de temperaturas entre o ar e o PV é maior, promovendo a maior taxa de transferência de calor.

A temperatura do PV não atinge valores muito elevados, uma vez que não passa dos 41 °C (Valor máximo obtido num dos quatros sensores, e não valor máximo da média visível na Figura 4.8). Este valor não sendo muito elevado é um factor positivo para o correcto funcionamento do PV.

O balanço energético do Modo 2 é representado na Figura 4.10.

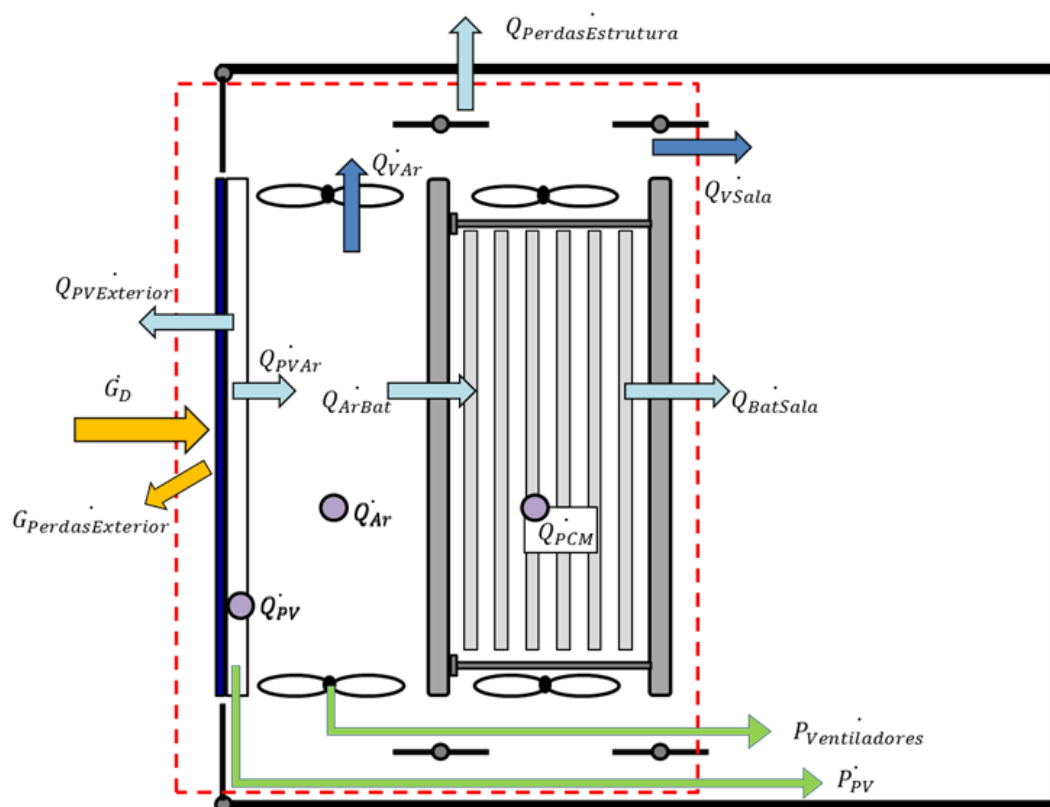


Figura 4.10 – Balanço energético, Modo 2

A eficiência global do Modo 2 é definida por:

$$\eta_{Modo2} = \frac{Q_{VSala} + P_{PV} - P_{Ventiladores}}{\dot{G}_D}$$

A eficiência térmica é definida por:

$$\eta_{TérmicaModo2} = \frac{Q_{VSala} - P_{Ventiladores}}{\dot{G}_D}$$

Os ventiladores, embora representem um consumo eléctrico são considerados intervenientes do processo térmico e não do eléctrico, uma vez que a sua principal função é o fluxo de calor através da convecção forçada. Embora o arrefecimento do PV possa significar um aumento na eficiência do mesmo, neste caso a sua influência é muito reduzida, como se poderá ver mais à frente. Será no entanto interessante comparar a energia produzida pelo PV e a consumida pelos ventiladores, comparação que será efectuada na análise energética dos dias em estudo.

A eficiência eléctrica é definida por:

$$\eta_{EléctricaModo2} = \frac{\dot{P}_{PV}}{\dot{G}_{D\ PV}}$$

Onde  $G_{D\ PV}$  representa a irradiância directa que atinge apenas o PV, e não toda a área do protótipo.

Na Figura 4.11 é representado o comportamento de cada uma das eficiências durante o período de análise.

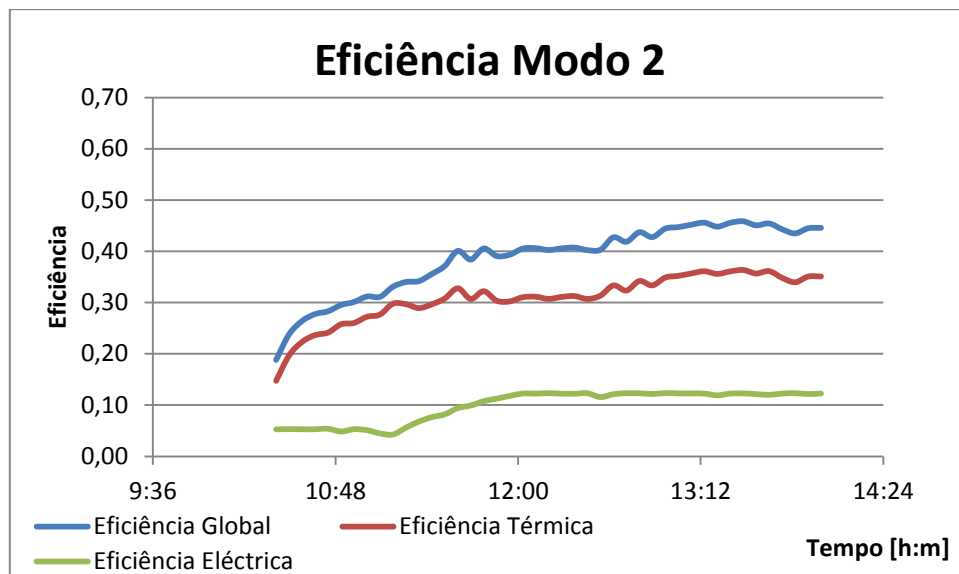


Figura 4.11 – Eficiências, Modo 2

A eficiência global do Modo de funcionamento 2 mostra atingir valores elevados, e que vão aumentando com o aumento da irradiância, estagnando no pico da irradiância solar, às 12:58h, e atingindo um máximo que ronda os 46%.

A eficiência global do Modo 2 deve-se principalmente ao aproveitamento da componente térmica, que representa uma eficiência máxima de 35%. A componente eléctrica do sistema representa uma menor quantidade da energia útil, pois como sabemos a eficiência do PV é confinada a valores relativamente baixos característicos do comportamento da tecnologia de silício cristalino.

A eficiência do PV, ou seja a eficiência eléctrica do sistema, demonstra manter um valor constante de 5% até por volta das 11:10h e depois um aumento gradual até estagnar nos 12% a partir das 12:00h.

A explicação deste fenómeno está relacionada com o facto de o sistema em estudo estar encastrado na parede, e com uma parte da fachada um pouco mais à frente do mesmo, o que faz com que o protótipo fique à sombra no período do início da manhã e do fim da tarde, quando o sol de encontra muito a Este ou muito a Oeste (este fenómeno foi explicado no capítulo 4.2).

Estudou-se ainda se o aumento de eficiência estaria relacionado com uma diminuição da temperatura do PV, e conclui-se que não se devia a um facto dessa natureza.



A exposição da eficiência do sistema pode ser difícil, uma vez que é algo novo e por isso não existe um princípio definido da representação do comportamento do mesmo. No entanto, funcionando o Modo de funcionamento 2 como um colector solar térmico, representou-se a eficiência em função da temperatura reduzida,  $\frac{T_{in}-T_a}{G_D}$  (Figura 4.12), como é prática comum neste tipo de sistemas. Neste caso o  $T_{in}$  é medido no sensor “Bateria inferior”, e representa a temperatura do ar à entrada.

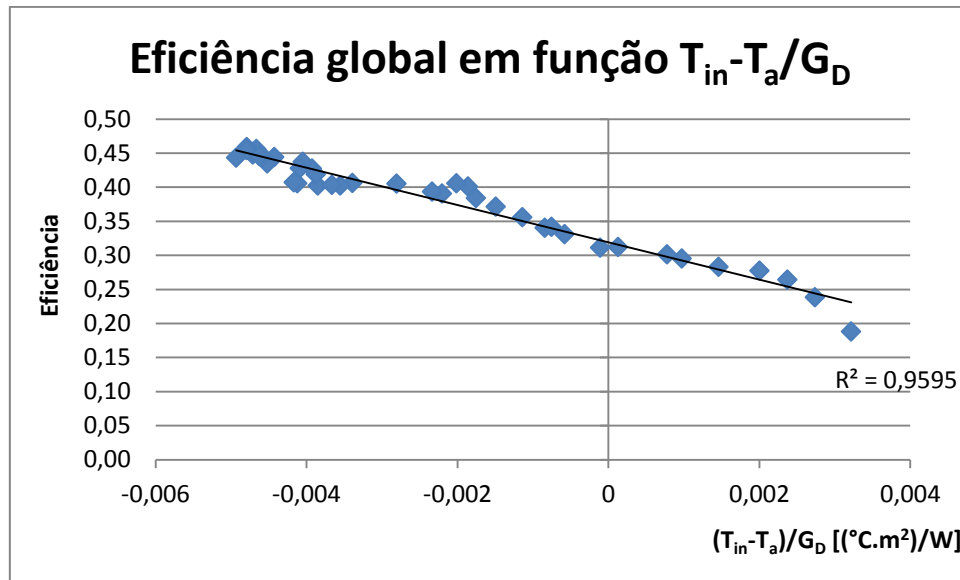
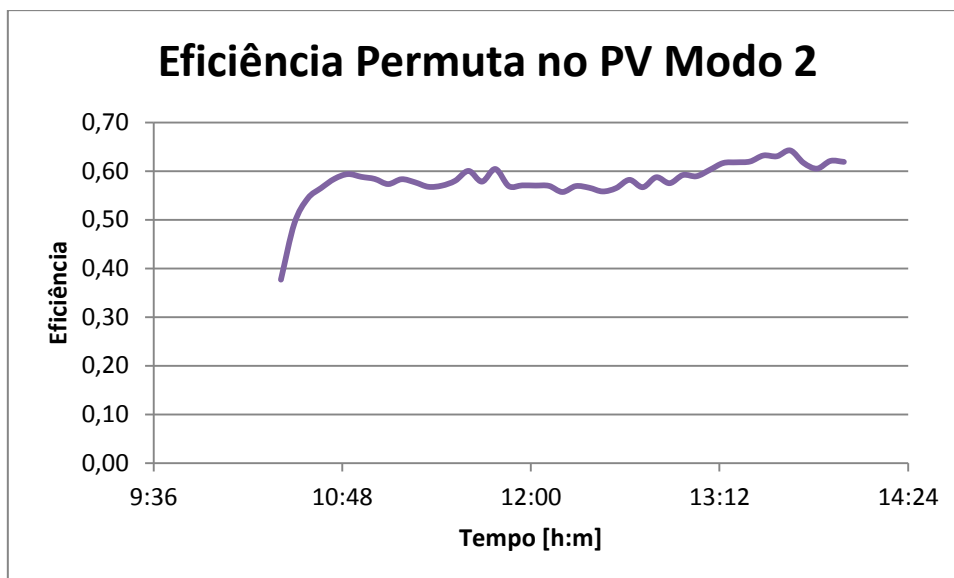


Figura 4.12 – Eficiência global em função de  $\frac{T_{in}-T_a}{G_D}$ , Modo 2

Verificou-se um comportamento linear, tal como nos colectores solares térmicos, com uma variância associada muito reduzida (0,9595).

De forma a entender também o processo de permuta energética no PV, calculou-se a eficiência dessa permuta de calor [19], ou seja, a razão entre a permuta real e a permuta ideal, em que o ar entraria na sala à temperatura do PV (Figura 4.13).

$$\eta_{\text{PermutaPVModo2}} = \frac{T_{\text{Bateria Superior}} - T_{\text{Bateria Inferior}}}{T_{\text{PVMédia}} - T_{\text{Bateria Inferior}}}$$



**Figura 4.13 – Eficiência de permuta de calor no PV, Modo 2**

Verificou-se que a eficiência de permuta de calor no Modo 2 alcançava valores elevados, na volta dos 60%, o que é bastante bom. No entanto, esta eficiência de permuta pode ser claramente melhorada através da colocação de alhetas no PV, o que vai aumentar a área de transferência de calor, aumentando também a eficiência do permutador.

#### 4.4.1.2 Análise Energética

A análise energética do Modo de funcionamento 2, segundo o método explicitado no subcapítulo 3.2, indica a eficiência integrada de todo o processo.

Os valores energéticos relevantes neste modo de funcionamento são apresentados no Quadro 4.3.

	$G_D$	$G_{D\ PV}$	$Q_{VSala}$	$P_{PV}$	$P_{Ventiladores}$
<b>Valor (kJ)</b>	7570	5857	2994	597	557

**Quadro 4.3 – Valores energéticos, Modo 2**

A eficiência energética global do Modo de funcionamento 2 é:

$$\eta_{Modo2} = \frac{Q_{VSala} + P_{PV} - P_{Ventiladores}}{G_D} = \frac{2994\ kJ + 597\ kJ - 557\ kJ}{7570\ kJ} = 0,394$$

A eficiência térmica:

$$\eta_{TérmicaModo2} = \frac{Q_{VSala} - P_{Ventiladores}}{G_D} = \frac{2994\ kJ - 557\ kJ}{7570\ kJ} = 0,322$$

E a eficiência eléctrica:

$$\eta_{EléctricaModo2} = \frac{P_{PV}}{G_{D_{PV}}} = \frac{597 \text{ kJ}}{5857 \text{ kJ}} = 0,102$$

É de referir novamente que a eficiência global tem um contributo significativo da componente térmica, como se pode perceber comparando a eficiência total de 39,4% com a eficiência térmica de 32,2%.

## 4.4.2 Modo 1 – Carregamento do PCM a partir do PV

### 4.4.2.1 Análise Instantânea

O Modo 1 tem por objectivo carregar o PCM com o calor proveniente do PV. O escoamento é feito no sentido da parte superior da bateria para a parte superior da cavidade de ar, como explicado no subcapítulo 2.3.1. Na Figura 4.14, é possível visualizar as temperaturas da cavidade de ar e na parte superior e inferior da bateria.

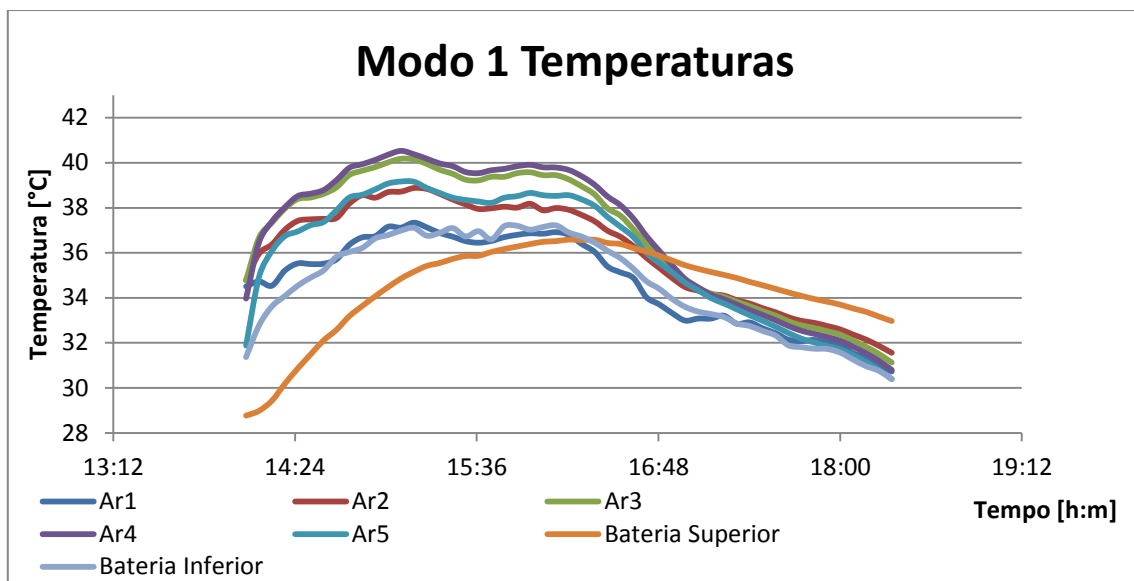


Figura 4.14 – Temperaturas, Modo 1

Novamente a temperatura do ar deve aumentar gradualmente à medida que vai progredindo sobre a superfície da parte traseira do PV, ou seja, deve aumentar desde o sensor “Bateria Superior” até ao sensor “Bateria Inferior”. No entanto isso apenas acontece até ao sensor “Ar4”, depois a partir daí a temperatura no sensor “Ar5” é menor, e no sensor “Bateria Inferior” ainda desce mais, igualando a temperatura no sensor “Ar1”, ou seja, a temperatura que chega à entrada da bateria, para carregar o PCM, é igual à temperatura no início do PV, o que demonstra alguma ineficiência do processo.

Tal como no Modo 2 isto acontece devido à perda de carga imposta pela forma do protótipo na parte superior e inferior da cavidade de ar, neste caso na parte inferior, que provavelmente cria uma acumulação de ar ou vórtices entre a zona do “Ar4” e “Ar5”. Este fenómeno pode perceber-se claramente através da Figura 4.15.

Os valores de temperaturas utilizados são uma média das temperaturas em cada sensor calculadas apenas no intervalo de tempo desde o início do Modo 1 até onde a temperatura do PCM atinge o seu máximo, ou seja, onde a eficiência é positiva.

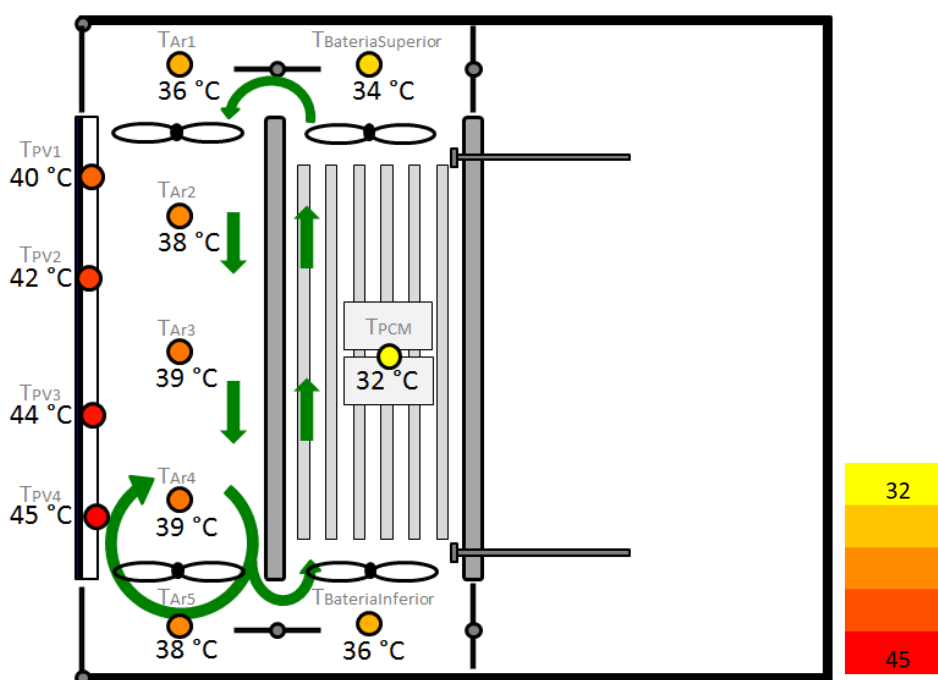


Figura 4.15 – Esquema gráfico de temperaturas, Modo 1

É possível visualizar que a temperatura ao longo da superfície do PV aumenta gradualmente, de cima para baixo. Este fenómeno deve-se ao facto de a quantidade de calor extraída na zona superior ser mais elevada, uma vez que a diferença de temperatura entre a superfície do PV e o ar também é maior. Para além disso a recirculação de ar quente na zona inferior faz com que nessa zona a transferência de calor seja menor.

É interessante verificar que a diferença de temperaturas ao longo do PV chega aos 5 °C. Uma vez que a cada sensor corresponde uma fila de células, pode afirmar-se que cada uma das filas está a uma temperatura diferente. Isso faz com que cada uma das filas de células tenha um comportamento diferente, ou seja, a fila superior a 40 °C vai produzir mais corrente do que a fila inferior a 45 °C. Isto poderia ser um problema uma vez que as filas de células estão todas em série, no entanto, os módulos estão equipados com díodos bypass que minimizam esta perda.

O processo de carregamento do PCM implica que o ar à entrada da bateria (“Bateria Inferior”) esteja a uma temperatura superior ao ar à saída da mesma (“Bateria Superior”), o que indica que uma parte

da energia correspondente a essa diferença de temperatura está a ser de facto transferida para o PCM.

Isso verifica-se até perto das 16:07h, onde este fenómeno se inverte, ou seja, a temperatura à saída da bateria é superior à temperatura à entrada da mesma (Figura 4.16). A partir desse momento o sistema passa a descarregar o PCM e não a carregá-lo. Isto deve-se ao facto da temperatura do PV ir diminuindo à medida que a irradiância decai no fim do dia. Neste momento, os ventiladores deveriam ter sido desligados, e o processo de carregamento da bateria, Modo de funcionamento 1, deveria ter sido parado.

Os ensaios realizados na presente dissertação foram efectuados apenas com recurso à operação manual do sistema. Não sendo possível a análise instantânea das condições envolvidas definiu-se horários predefinidos para a alteração dos modos de funcionamento, sujeitando assim o sistema a uma possível gestão ineficiente. Esta temática é discutida no capítulo 5.

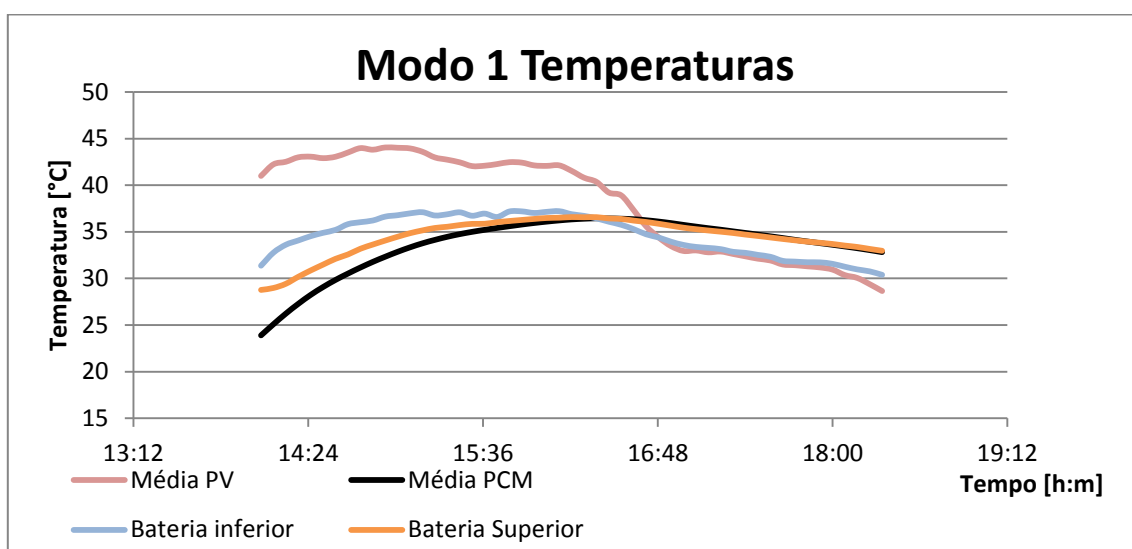


Figura 4.16 – Temperaturas 2, Modo 1

Na verdade deveria ter sido desligado antes. Quando a temperatura à saída da bateria iguala a temperatura à entrada, isso indica que a eficiência de transferência de calor é igual a zero, ou seja, não está a ser armazenada energia. No entanto, há outro factor a ser tido em conta, está a ser consumida energia nos ventiladores, e por isso o ponto de eficiência igual a zero é quando a energia que está a ser armazenada iguala a energia que está a ser consumida.

Por essa razão, ao longo desta análise alguns gráficos e respectivas observações vão ser apenas referentes ao período em que a eficiência de carregamento do PCM é positiva, ou seja, até às 16:07h como é referido no calendário inicial.

O balanço energético do Modo 1 é representado na Figura 4.17.

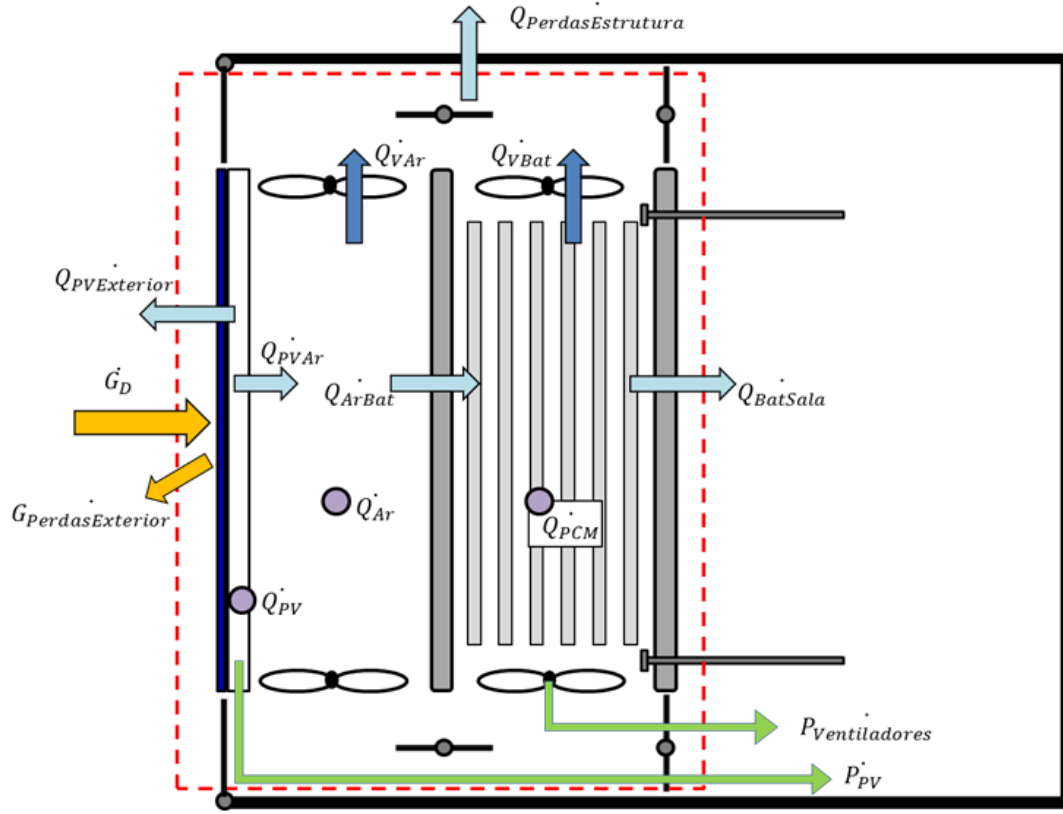


Figura 4.17 – Balanço energético, Modo 1

O  $Q_{VAr}$  flui de cima para baixo, uma vez que o escoamento vem da parte superior da bateria para a parte superior da cavidade de ar. Embora esteja no desenho representado ao contrário, é apenas uma forma geral de representar esse fluxo energético, uma vez que varia de uns modos de funcionamento para os outros. A seta é sempre indicada da mesma forma, embora os sentidos variem.

A eficiência global do Modo 1 é definida por:

$$\eta_{Modo1} = \frac{Q_{PCM} + P_{PV} - P_{Ventiladores}}{\dot{G}_D}$$

A eficiência térmica é definida por:

$$\eta_{TérmicaModo1} = \frac{Q_{PCM} - P_{Ventiladores}}{\dot{G}_D}$$

A eficiência eléctrica é definida por:

$$\eta_{EléctricaModo1} = \frac{P_{PV}}{\dot{G}_{DPV}}$$

Na Figura 4.18 é representado o comportamento de cada uma das eficiências durante o período de análise.

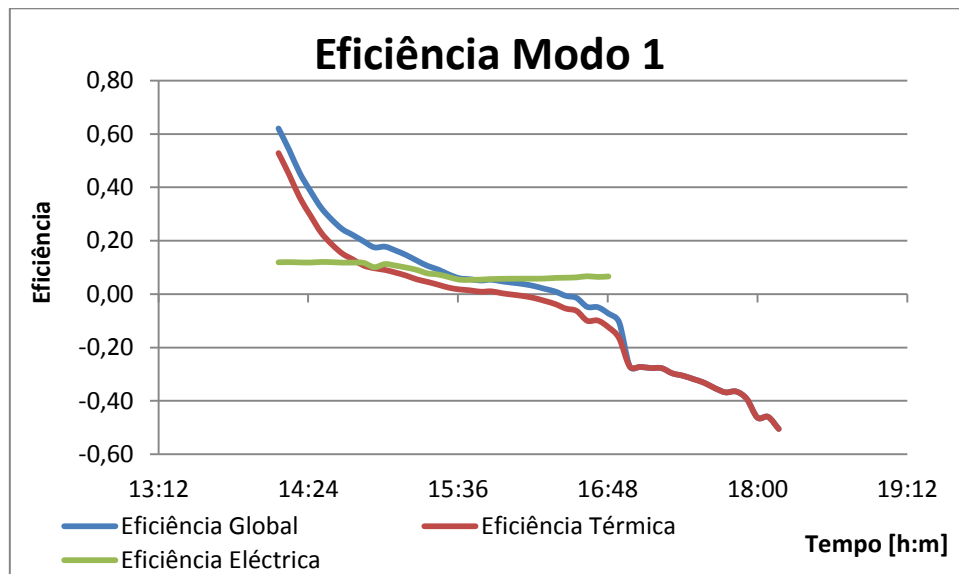


Figura 4.18 Eficiências, Modo 1

A eficiência do Modo 1 é elevada ao início, mas vai sempre decrescendo até atingir o ponto de eficiência igual a zero. Essa descida deve-se ao facto de a diferença de temperaturas entre o PV e o PCM ir diminuindo à medida que o PCM é carregado. Chegando a um ponto em que, como já foi constatado anteriormente, o PCM começa a ser descarregado. Esse ponto não é identificável no gráfico, apenas se pode identificar o ponto em que a energia que está a ser armazenada iguala a energia consumida pelos ventiladores, que corresponde à intersecção entre a eficiência térmica e o eixo horizontal, ou seja:

$$\eta_{TérmicaModo1} = \frac{Q_{PCM} - P_{Ventiladores}}{\dot{G}_D} = 0$$

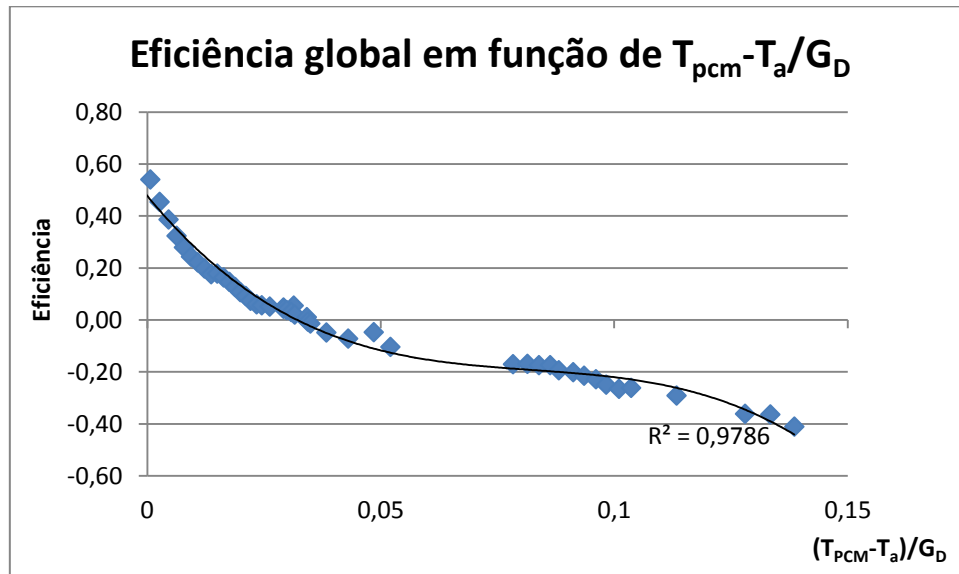
O que implica que:

$$Q_{PCM} = P_{Ventiladores}$$

Novamente, devido ao sombreamento criado quando o sol está demasiado a Este ou a Oeste, existe uma variação na eficiência eléctrica a partir das 15:00h, decaindo dos 12% para os 5%.

Optou-se por analisar a eficiência eléctrica apenas até às 16:48h, uma vez que a partir daí os valores de irradiância eram muito reduzidos, conduzindo a valores de eficiência incompreensíveis, assumindo-se eficiência nula. Devido a essa opção, a partir dessa hora, a eficiência global do Modo 1 é idêntica à eficiência térmica.

A eficiência global do Modo de funcionamento 1 é representada em função de  $\frac{T_{PCM}-T_a}{G_D}$  (Figura 4.19), seguindo uma distribuição polinomial de 3º grau (Figura 4.19).



**Figura 4.19 – Eficiência em função de  $\frac{T_{PCM}-T_a}{G_D}$ , Modo 1**

Para analisar o processo de permuta de energia no Modo de funcionamento 1 é necessário identificar neste modo dois permutadores. O primeiro corresponde à permuta de energia entre o PV e o ar da cavidade de ar. O segundo permutador corresponde à permuta de energia entre o ar que entra na bateria térmica e o PCM.

As eficiências de cada um desses permutadores são calculadas segundo as expressões:

$$\eta_{PermutaPVModo1} = \frac{T_{Bateria Inferior} - T_{Bateria Superior}}{T_{PVMédia} - T_{Bateria Superior}}$$

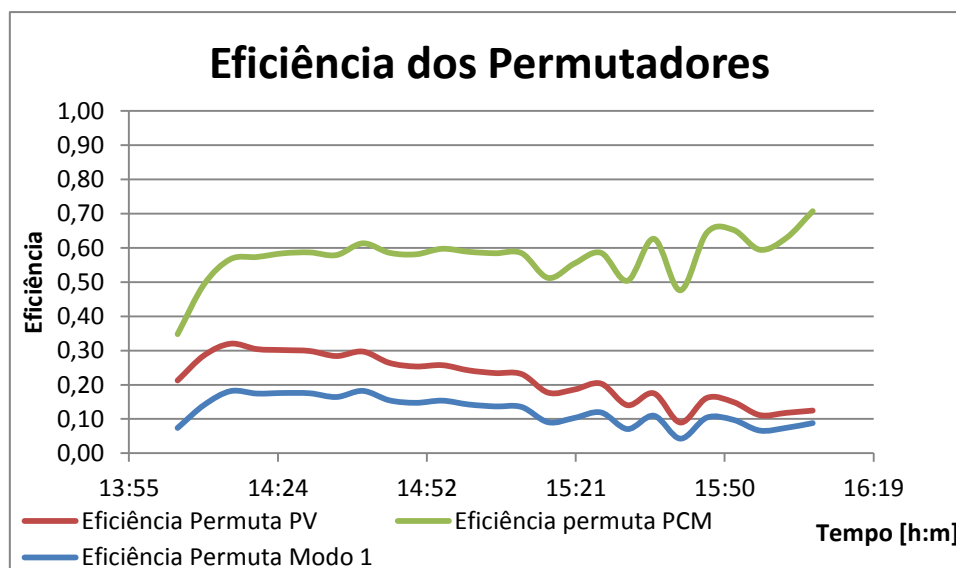
$$\eta_{PermutaPCModo1} = \frac{T_{Bateria Superior} - T_{Bateria Inferior}}{T_{PCMédia} - T_{Bateria Inferior}}$$

A eficiência de permuta de calor global do Modo 1 é dada pelo produto das eficiências dos dois permutadores:

$$\eta_{PermutaModo1} = \eta_{Permutador1Modo1} * \eta_{Permutador2Modo1}$$



Na Figura 4.20 é possível visualizar as eficiências dos permutadores referidos.



**Figura 4.20 – Eficiências de permuta de calor, Modo 1**

A eficiência de permuta no PV é muito reduzida (10-30%), devido à recirculação de ar na parte inferior da cavidade de ar. Verifica-se também que a eficiência de permuta vai decrescendo, devendo-se isso ao facto da diferença de temperaturas entre o ar e o PV ir diminuindo.

A eficiência de permuta no PCM apresenta valores superiores (60%), que de pouco valem à totalidade do processo, uma vez que apenas uma pequena parte da energia do PV chega à entrada da bateria. No entanto, é de valorizar a elevada taxa de transferência de calor conseguida na bateria térmica, o que mostra que a bateria como permutador é bastante eficiente, e que o conceito de várias placas paralelas funciona.

A eficiência de permuta total do Modo 1, dado pelo produto entre os dois permutadores individuais, é de facto reduzida (10-20%), devido principalmente à limitada eficiência de permuta no PV.

Há que ter em conta que esta eficiência se refere apenas à energia transferida do PV para o PCM através da convecção forçada (ventilação). Existe no entanto outra forma de transferência de calor para o PCM, o fluxo de calor através do isolamento. No cálculo da eficiência do Modo 1 é tida em conta a energia armazenada no PCM, por ambas as vias, e não apenas pela via da convecção forçada, e isso faz com que o valor da eficiência do Modo 1 suba para os 15,5% (apenas tendo em conta o período de carregamento do PCM), como se verá mais à frente na análise energética.

#### **4.4.2.2 Análise Energética**

A análise energética do Modo de funcionamento 1, segundo o método explicitado no capítulo 3, é apresentada neste subcapítulo.

Os valores energéticos relevantes neste modo de funcionamento são apresentados no Quadro 4.4, onde o índice “+” é representativo do período em que o PCM não está a ser descarregado (eficiência térmica positiva).

	$G_D$	$G_{D+}$	$G_{D\ PV}$	$Q_{PCM}$	$Q_{PCM+}$	$P_{PV}$	$P_{PV+}$	$P_{Ventiladores}$	$P_{Ventiladores+}$
Valor (kJ)	5809	4045	4495	639	784	417	300	332	159

Quadro 4.4 – Valores energéticos, Modo 1

A eficiência energética global do Modo de funcionamento 1 é:

$$\eta_{Modo1} = \frac{Q_{PCM} + P_{PV} - P_{Ventiladores}}{G_D} = \frac{639\ kJ + 417\ kJ - 332\ kJ}{5809\ kJ} = 0,125$$

A eficiência global do Modo 1 apenas no período em que não há descarregamento do PCM é:

$$\eta_{Modo1+} = \frac{Q_{PCM+} + P_{PV+} - P_{Ventiladores+}}{G_{D+}} = \frac{784\ kJ + 300\ kJ - 159\ kJ}{4045\ kJ} = 0,229$$

A eficiência térmica:

$$\eta_{TérmicaModo1} = \frac{Q_{PCM} - P_{Ventiladores}}{G_D} = \frac{639\ kJ - 332\ kJ}{5809\ kJ} = 0,053$$

A eficiência térmica apenas no período em que não há descarregamento do PCM é:

$$\eta_{TérmicaModo1+} = \frac{Q_{PCM+} - P_{Ventiladores+}}{G_{D+}} = \frac{784\ kJ - 159\ kJ}{4045\ kJ} = 0,155$$

E a eficiência eléctrica:

$$\eta_{EléctricaModo1} = \frac{P_{PV}}{G_{D\ PV}} = \frac{417\ kJ}{4495\ kJ} = 0,093$$

A eficiência térmica do Modo 1 verificou ser influenciada pela ineficiente gestão do protótipo que se deveu ao facto de ser manejado manualmente, e portanto ter-se deixado descarregar o PCM. Esse facto é evidenciado pela comparação entre as eficiências de 15,5% na análise sem descarregamento do PCM (eficiência térmica positiva), e de 5,3% na análise de todo o período do Modo 1.

É possível verificar através da energia armazenada no PCM em ambas as análises, que no ponto de máximo carregamento do PCM a energia armazenada é 784 kJ e posteriormente no fim do período do Modo 1 é 639 kJ, o que evidencia que o PCM foi carregado, e posteriormente perdeu uma parte dessa energia.

Embora a eficiência do Modo 1, analisando apenas o período de carregamento do PCM, seja 22,9% há que ter em conta que cerca de metade dessa eficiência global se deve à componente eléctrica.

### 4.4.3 Modo 3 – Aquecimento da sala a partir do PCM

#### 4.4.3.1 Análise Instantânea

O Modo de funcionamento 3 tem a função de aquecer a sala com a energia armazenada no PCM durante o Modo de funcionamento 1. Na Figura 4.21 estão ilustradas as temperaturas pertinentes para a análise deste modo.

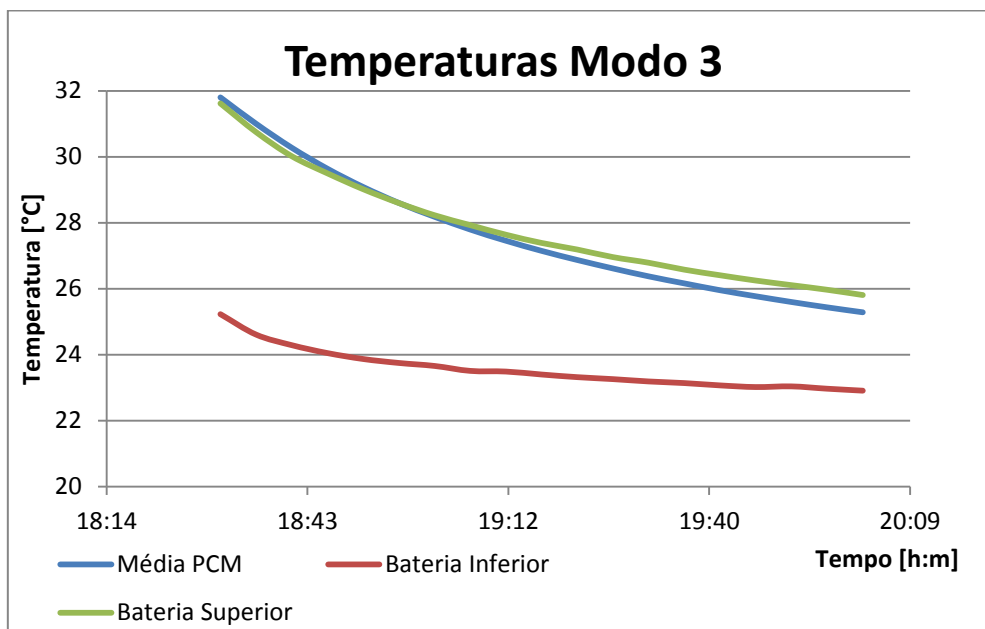


Figura 4.21 – Temperaturas, Modo 3

O ar proveniente da sala passa pelo sensor “Bateria Inferior”, percorre a superfície do PCM, e acaba por sair passando pelo sensor “Bateria superior”.

O facto de grande parte do tempo a temperatura à saída da bateria (Bateria superior) ser superior à temperatura média do PCM (Figura 4.21) demonstra uma certa impossibilidade visto que o ar nunca pode sair a uma temperatura superior à temperatura da fonte de calor.

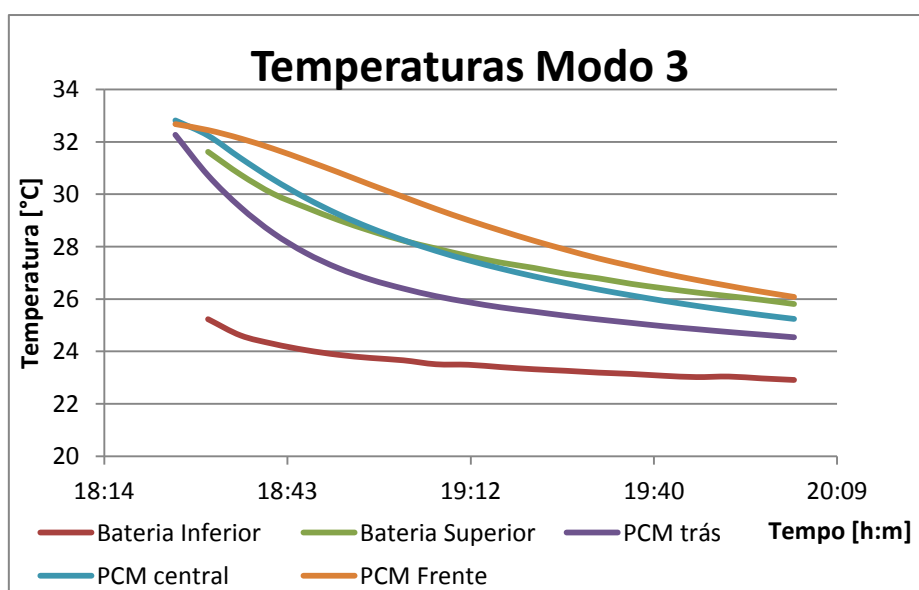
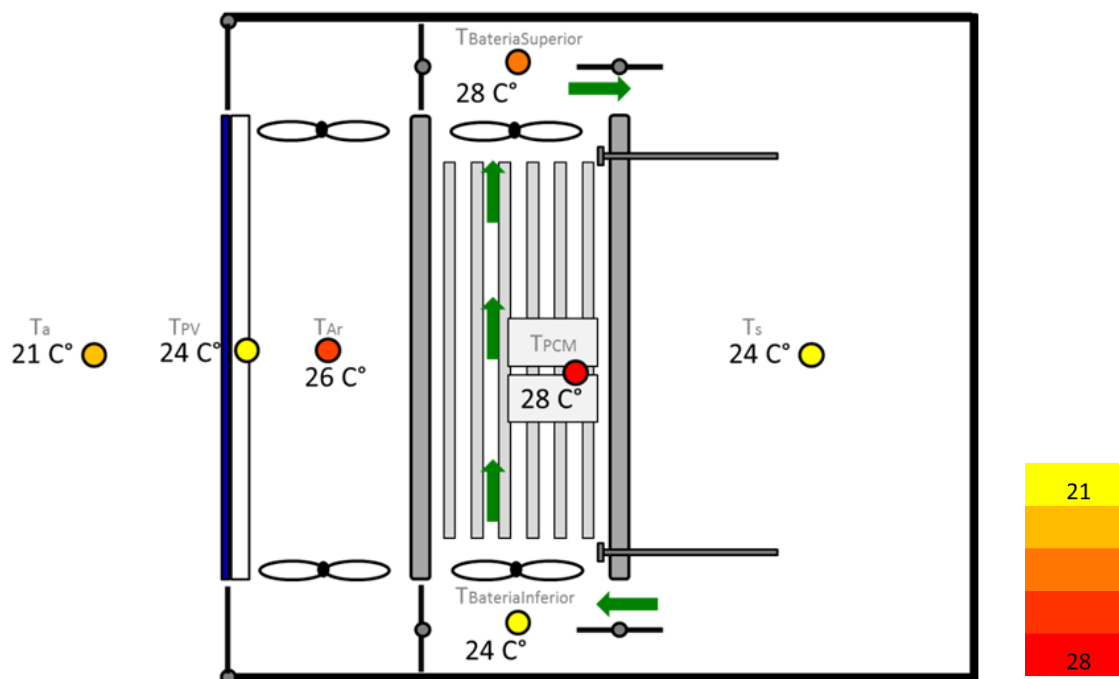


Figura 4.22 – Temperaturas 2, Modo 3

No entanto, se representarmos as temperaturas dos três sensores colocados no PCM (Mapa de sensores, subcapítulo 3.1.5), é perceptível que o fenómeno é perfeitamente credível, uma vez que uma das placas de PCM se encontra a uma temperatura superior à temperatura de saída da bateria (Figura 4.22).

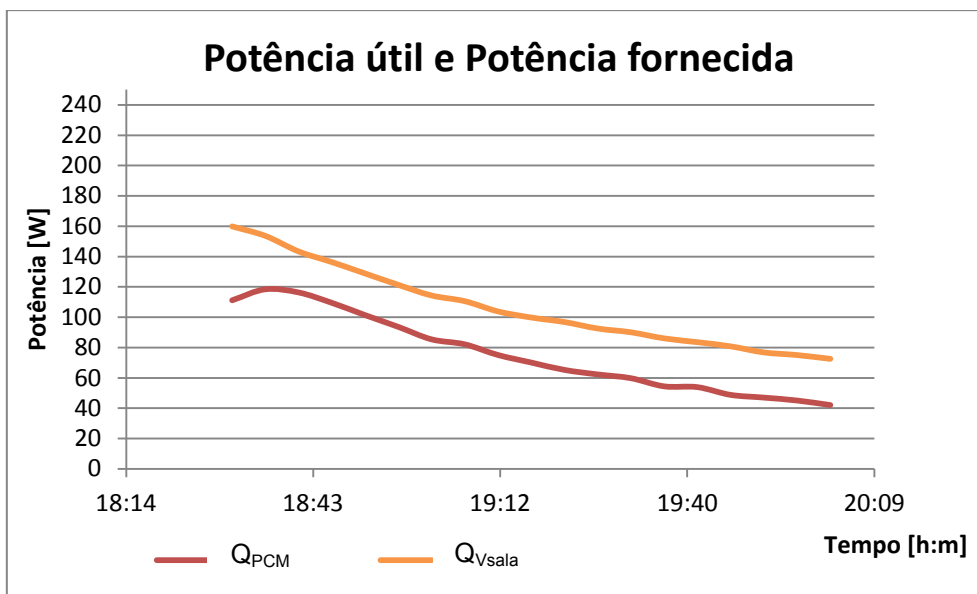
A Figura 4.23 ilustra o esquema gráfico das temperaturas no Modo de funcionamento 3.



**Figura 4.23 – Esquema gráfico de temperaturas, Modo 3**

É possível visualizar que o ar à saída da bateria tem a mesma temperatura que a média do PCM (Figura 4.23). O facto de o ar sair da bateria a uma temperatura igual à média da temperatura do PCM indica que estamos perante uma permuta de energia com eficiência próxima de 1, pois o ar extrai a máxima quantidade de calor possível ao PCM, ficando à temperatura do mesmo.

Ao analisar a energia que é libertada pelo PCM ( $Q_{PCM}$  – Potência fornecida) e a energia que flui por meio da convecção forçada para a sala ( $Q_{Vsala}$  – Potência útil), verifica-se uma impossibilidade, a primeira é inferior à segunda (Figura 4.24).



**Figura 4.24 – Potência útil ( $Q_{v_{sala}}$ ) e potência fornecida ( $Q_{PCM}$ ), Modo 3**

Tendo em conta que a eficiência de permuta é muito próxima de 1, como foi visto anteriormente, qualquer erro que possa existir pode significar a impossibilidade verificada.

É possível visualizar que as curvas seguem o mesmo comportamento (Figura 4.24), o que demonstra existir uma relação clara entre ambas as curvas, ou seja, o erro é sistemático. Esta discrepância pode dever-se a erros instrumentais na medida da temperatura do PCM ou do ar, uma vez que se trata de diferentes sensores, o que mede a temperatura do PCM é de superfície e está encastrado numa capsula, o que lhe pode dar alguma inércia, e o que mede a temperatura do ar não possui qualquer capsula.

Pode dever-se também a um erro de medida no caudal ou na massa do PCM. Ambas as curvas dependem de um factor constante que pode fazer com que uma delas, ou ambas, se movimentem ligeiramente na vertical levando a este erro sistemático. No caso da curva que descreve a potência libertada pelo PCM, esse factor constante é a massa do PCM, pois a energia armazenada nele é dada em função da massa (capítulo 3.2.7). No caso da curva que descreve a potência que flui por meio da convecção forçada para a sala, o factor constante é o caudal (capítulo 3.2.5). Qualquer erro que possa existir numa das constantes descritas anteriormente faz com que as curvas se movimentem verticalmente. Por exemplo, se assumirmos que o caudal que medimos tem um erro, e que é superior ao real, então a curva da potência que flui para a sala está ligeiramente acima do que devia estar.

Por outro lado pode existir um input de energia proveniente da estrutura do protótipo que influenciará a quantidade de energia que flui para a sala. O que na Figura 4.25 está representado como perdas para a estrutura, seria neste caso um ganho. Não existindo qualquer instrumento, como um sensor de temperatura ou um fluxímetro, colocado na superfície da estrutura do protótipo, não é possível verificar essa hipótese.

Sendo que o sistema em estudo não é semelhante ao longo do seu comprimento, ou seja, os ventiladores não cobrem toda a área de PCM, é ainda possível que estejamos a ter em conta uma temperatura de saída do ar que é a mais alta ao longo de toda a saída de ar da bateria. Isto é, por apenas se ter um sensor de temperatura ao longo de toda a saída de ar, e sabendo que esta saída de ar é irregular, devido ao facto de os ventiladores não cobrirem em comprimento todo o protótipo, é possível que estejamos a medir o valor mais alto ao longo de todo esse comprimento.

O balanço energético do Modo 3 é representado na Figura 4.25.

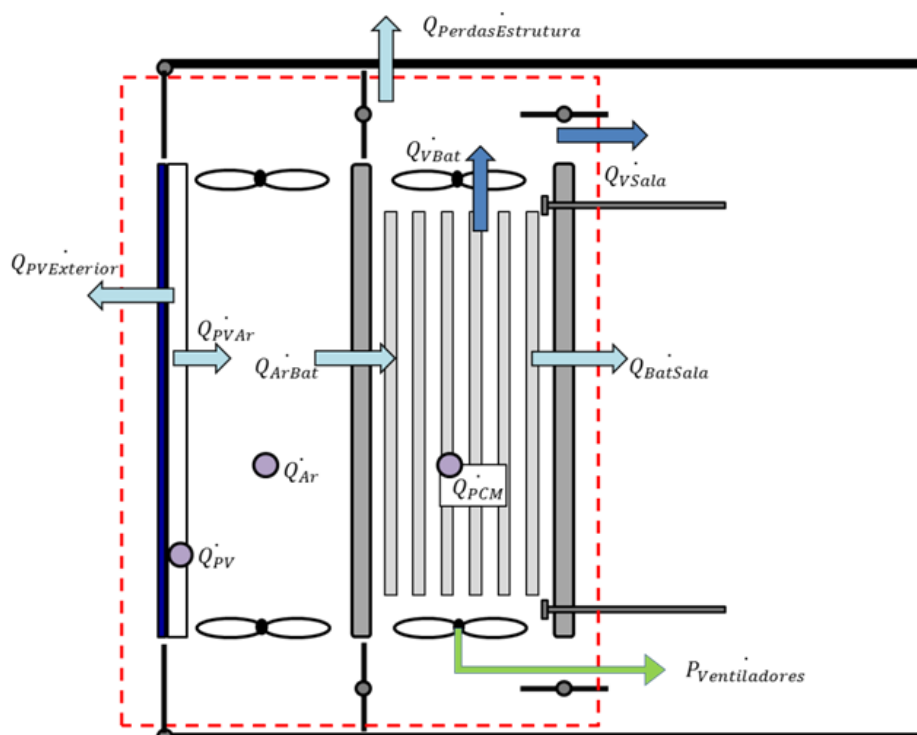


Figura 4.25 – Balanço energético, Modo 3

A eficiência global do Modo 3 é definida por:

$$\eta_{Modo3} = \frac{Q_{VSala} - P_{Ventiladores}}{Q_{PCM}}$$

O Modo 3 é caracterizado por funcionar no período noturno do dia, quando já não existe radiação solar e existe uma maior carência de energia. Por não existir radiação no período de funcionamento do Modo 3, este não possui eficiência eléctrica, e pode considerar-se que a eficiência global do Modo 3 é a eficiência térmica do mesmo.

#### 4.4.3.2 Análise Energética

A análise energética é feita com base nos parâmetros  $Q_{PCM}$  e  $Q_{VSala}$  ilustrados na Figura 4.24, que como já foi referido possuem um erro associado. Dessa forma, com base nos recursos disponíveis, e sabendo que a temperatura à saída da bateria é igual à temperatura média do PCM, assume-se uma eficiência do processo de aproximadamente 1.

Os valores energéticos relevantes no Modo de funcionamento 3 são apresentados no Quadro 4.5.

	$Q_{VSala}$	$Q_{PCM}$	$P_{Ventiladores}$
Valor (kJ)	611	432	123

Quadro 4.5 – Valores energéticos, Modo 3

A eficiência energética global do Modo de funcionamento 3 é:

$$\eta_{\text{Modo3}} = \frac{Q_{\text{VSala}} - P_{\text{Ventiladores}}}{Q_{\text{PCM}}} \approx 1$$

A eficiência do Modo de funcionamento 3 é elevada, o que demonstra a capacidade de permuta da bateria térmica, que já tinha sido confirmada no Modo 1, embora com uma menor eficiência, cerca de 60%, devido às perdas de carga desse modo. Embora saibamos que existe um erro no cálculo da eficiência calculada, sabemos também que o ar à saída da bateria sai a uma temperatura igual à temperatura média do PCM, o que assinala a alta eficiência do processo.

#### 4.4.4 Análise energética – Inverno

Com base nos modos de funcionamento de inverno, estudados e descritos anteriormente, e segundo o calendário apresentado no início do capítulo, é agora estudado o balanço energético de todo o dia em estudo (Regime de Inverno 1). É importante referir que o período em que o sistema esteve inactivo (Modo 7), das 20:00h do dia 4 até às 10:24h do dia 5, também foi contabilizado nesta análise energética, de modo a poder atribuir-se uma eficiência total ao dia em estudo.

O balanço energético geral de inverno é apresentado na Figura 4.26:

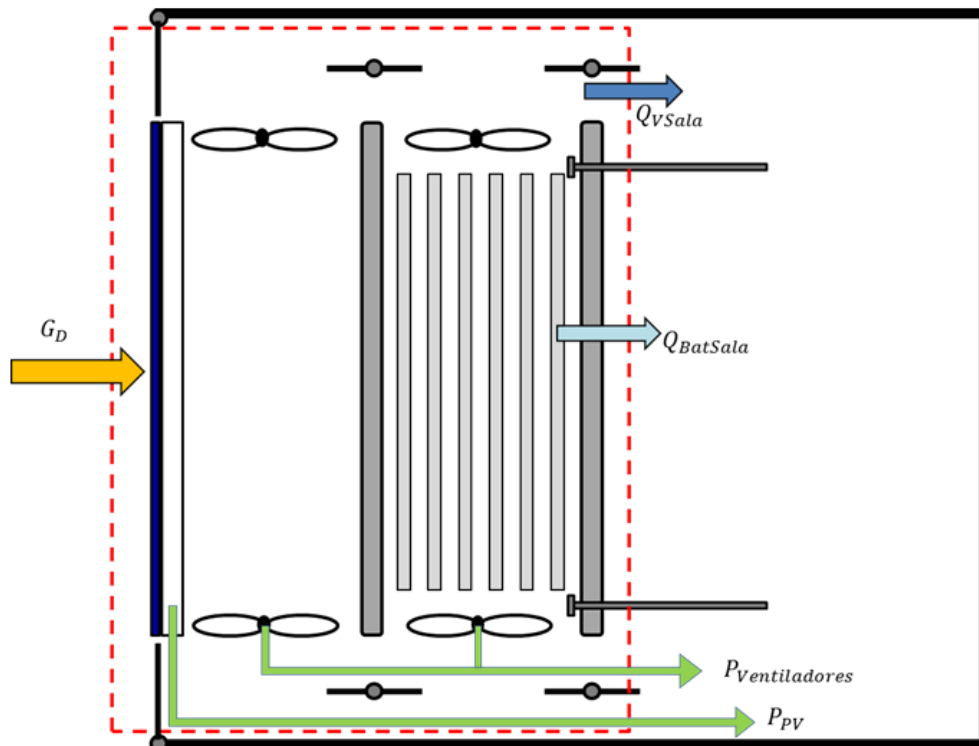


Figura 4.26 – Balanço energético, Inverno

Para todos os efeitos, durante o período de inverno o importante é que exista aquecimento da sala, ou seja, que da energia que chega à parte frontal do sistema, seja máxima a que passa posteriormente para o interior da sala ou é convertida em electricidade.

Nos subcapítulos anteriores estudou-se especificamente cada modo de funcionamento, e como tal calculou-se a eficiência do ponto de vista do processo, e do objectivo de cada um desses modos, e não a eficiência do ponto de vista do sistema.

No caso da análise geral de inverno, a abordagem é muito mais simples. A eficiência calculada é do ponto de vista do sistema, e sendo assim, é apenas preciso contabilizar quanta da energia que chegou ao sistema, entrou dentro da sala, independentemente do processo, se por convecção forçada ou por fluxo condutivo/convectivo através do isolamento.

Os valores energéticos relevantes são apresentados no Quadro 4.6. O índice numerário é referente aos Modos de funcionamento 1, 2 ou 3.

	$G_D$	$G_{DPV}$	$Q_{VSala}$		$Q_{BatSala}$	$P_{PV}$	$P_{Ventiladores}$		
			$Q_{VSala2}$	$Q_{VSala3}$			$P_{Vent.2}$	$P_{Vent.1}$	$P_{Vent.3}$
Valor (kJ)	15737	12178	2994	611	246	1151	557	332	123

Quadro 4.6 – Valores energéticos, Inverno

A eficiência global total do Regime de inverno 1 é definida pela seguinte expressão:

$$\eta_{Inverno1} = \frac{Q_{VSala} + Q_{BatSala} + P_{PV} - P_{Ventiladores}}{G_D}$$

$$= \frac{(2994 \text{ kJ} + 611 \text{ kJ}) + 246 \text{ kJ} + 1151 \text{ kJ} - (557 \text{ kJ} + 332 \text{ kJ} + 123 \text{ kJ})}{15737 \text{ kJ}} = 0,254$$

A eficiência térmica é:

$$\eta_{TérmicaInverno1} = \frac{Q_{VSala} + Q_{BatSala} - P_{Ventiladores}}{G_D}$$

$$= \frac{(2994 \text{ kJ} + 611 \text{ kJ}) + 246 \text{ kJ} - (557 \text{ kJ} + 332 \text{ kJ} + 123 \text{ kJ})}{15737 \text{ kJ}} = 0,180$$

E a eficiência Eléctrica:

$$\eta_{EléctricaInverno1} = \frac{P_{PV}}{G_{DPV}} = \frac{1151 \text{ kJ}}{12178 \text{ kJ}} = 0,095$$

A eficiência obtida para o dia de inverno estudado demonstra um valor razoavelmente positivo: 25,4%. O que significa que 25,4% da energia que chega à parte frontal do protótipo entra para a sala ou é convertida em electricidade.

Da energia que chega ao módulo fotovoltaico, apenas 9,5% é convertida em electricidade, sendo este um valor comum e aceitável tendo em conta as limitações de ligação do mesmo (subcapítulo 2.2.1).



A eficiência térmica atinge o valor de 18%.

Termicamente o sistema demonstrou ser muito eficiente quando se aquece directamente a sala, Modo 2 (39,4%). No entanto, devido às perdas de carga impostas pela forma ineficiente de escoamento entre a cavidade de ar e a bateria térmica (Modo de funcionamento 1), a eficiência do protótipo como armazenador de calor mostrou-se pouco eficaz (15,5%), baixando a eficiência térmica do mesmo.

É de notar que o balanço energético por condução através do isolamento da bateria,  $Q_{BatSala}$ , é positivo ao longo do dia, com o valor de 246 kJ. O que significa que existe mais energia a entrar para a sala por condução do que energia a sair, embora existam períodos em que realmente o sentido da energia é da sala para o exterior. Este fenómeno é claramente característico da presença do PCM, uma vez que este devido à sua inércia térmica se mantém a uma temperatura mais alta durante mais tempo não promovendo o fluxo de energia da sala para o exterior.

Outro factor interessante a ter em conta é o balanço energético relativo à energia eléctrica produzida e consumida. Esse balanço é calculado através da expressão:

$$Balanço_{Eléctrico} = \frac{P_{Ventiladores}}{P_{PV}} = \frac{557 + 159 + 123}{1151} = 0,729$$

A energia consumida pelos ventiladores é 72,9% da energia produzida pelo PV.

A percentagem de energia consumida relativamente à produzida é alta (72,9%). Visto de outra perspectiva, o balanço é positivo, ou seja, o PV sustenta autonomamente os ventiladores, isto é, pelo menos no dia em estudo não seria necessário consumir energia de outras fontes externas para a gestão do sistema.

## 4.5 Resultados experimentais de Verão

O objectivo do sistema no período de verão é fazer o arrefecimento/isolamento da sala.

No período de verão testaram-se dois regimes de funcionamento distintos, o Regime de Verão 2 e o Regime de Verão 3 (subcapítulo 4.1).

Como já descrito, um regime é um conjunto de modos de funcionamento. Ao contrário da análise experimental de inverno, em que só se testou um regime, na análise experimental de verão, optou-se por testar dois regimes de funcionamento, sendo que estes são comparados ao longo da análise.

Ambos os regimes de verão englobam o Modo de funcionamento 5 (Descarregamento do PCM para o exterior), que é um modo utilizado no período nocturno. O que os faz diferir é o modo utilizado no período diurno. No Regime de Verão 2 é utilizado o Modo 9 (Inactivo de Verão), enquanto que no Regime de Verão 3 é utilizado o Modo 8 (Ventilação do PV com o exterior). A diferença entre eles é apenas o facto de no Modo 8 se ventilar o PV, enquanto no Modo 9 a ventilação está inactiva.

Por se ter definido que as comportas exteriores eram de movimentação sazonal, durante o verão estas estão continuamente abertas ainda que o protótipo esteja em modo inactivo. O facto de as comportas estarem abertas mesmo quando não existe ventilação forçada faz com que exista ventilação natural devido ao aquecimento do ar na cavidade de ar. Pode então afirmar-se que o que

distingue os modos de funcionamento é a ventilação forçada (Modo 8) ou a ventilação natural (Modo 9).

Neste subcapítulo referente à análise experimental de verão, o Modo de funcionamento 5 (Descarregamento do PCM para o exterior) será analisado individualmente. Os Modos de funcionamento 8 e 9 serão analisados simultaneamente de forma a fazer-se uma comparação entre eles. Juntamente será analisado e comparado também o sistema BIPV/T do Edifício Solar XXI.

O calendário dos regimes de funcionamento está descrito no Quadro 4.7:

Dia	Modo de funcionamento	Regime	Período Horário
10 Julho	<b>Modo 9</b> – Inactivo Verão	Verão 2	0h → 1h
	<b>Modo 5</b> – Descarregamento do PCM para o exterior		1h → 5h
	<b>Modo 9</b> – Inactivo Verão		5h → 0h
11 Julho	<b>Modo 9</b> – Inactivo Verão	Verão 3	0h → 1h
	<b>Modo 5</b> – Descarregamento do PCM para o exterior		1h → 5h
	<b>Modo 9</b> – Inactivo Verão		5h → 10h
	<b>Modo 8</b> – Arrefecimento do PV a partir do exterior		10h → 18h
	<b>Modo 9</b> – Inactivo Verão		18h → 0h
11 Julho	<b>BIPV-T</b>	-	0h → 24h

**Quadro 4.7 – Calendarização de experimentação de verão**

Embora no Regime de Verão 3, o Modo de funcionamento 8 seja o mais relevante, em alguns períodos deste regime utilizou-se o Modo 9, uma vez que este é o modo inactivo, isto é, em períodos em que se considera que o sistema deve ficar inactivo por não ter coerência activar o Modo 5 ou 8, o sistema é colocado no Modo 9 (Inactivo).

#### **4.5.1 Modo 5 – Descarregamento do PCM para o exterior**

O Modo de funcionamento 5 tem por objectivo, por meio do ar exterior, fazer o descarregamento do PCM, baixando a sua temperatura, e consequentemente libertando a energia contida no mesmo, e que foi acumulada durante o período diurno (Modo 8 ou 9), para desta forma preparar o PCM para absorver energia durante o período diurno do próximo dia evitando assim que essa energia flua para dentro da sala (subcapítulo 2.3.5).

As figuras Figura 4.27 e Figura 4.28 representam a distribuição das temperaturas nos vários sensores do protótipo.

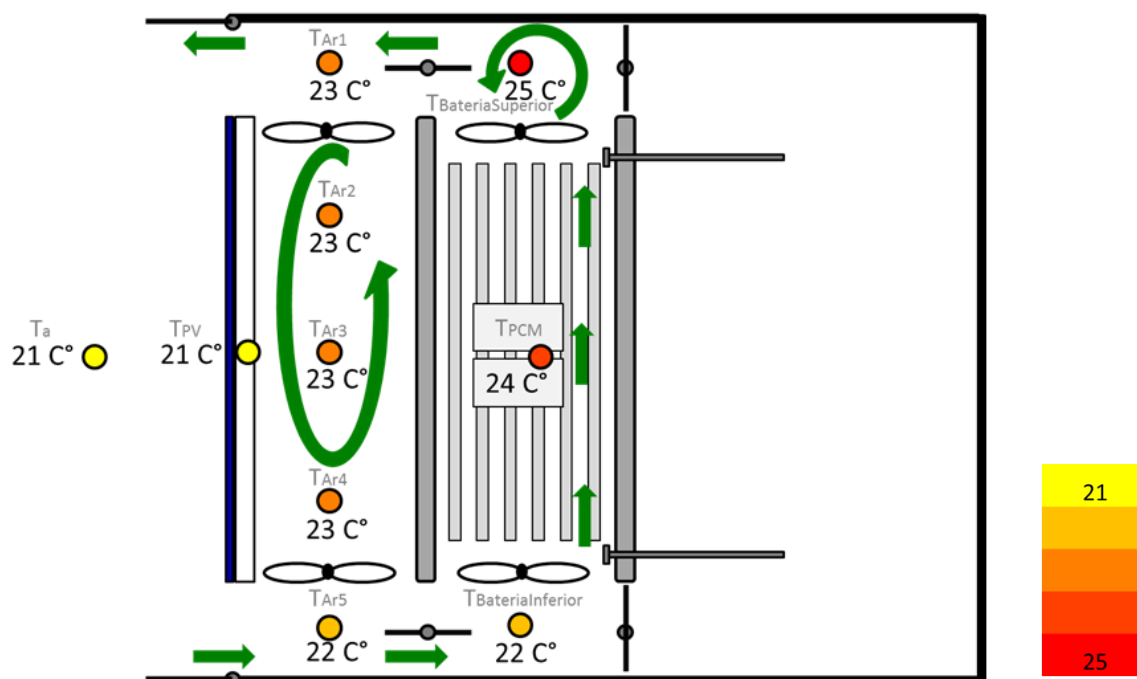


Figura 4.27 – Esquema gráfico de temperaturas, dia 10, Modo 5

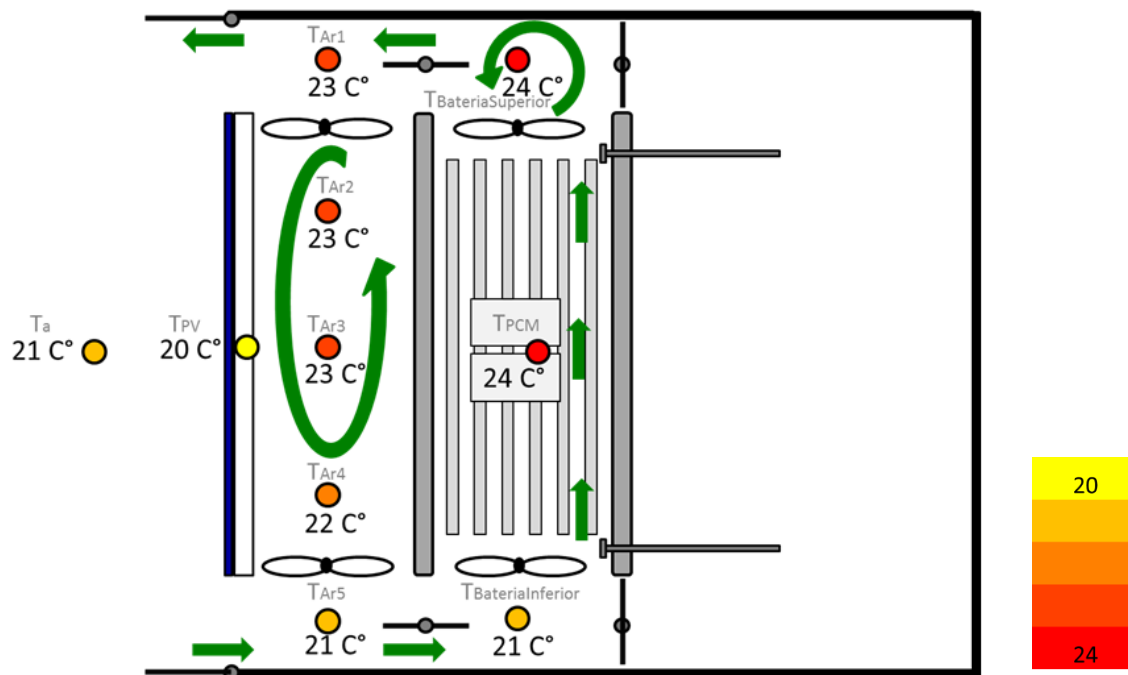


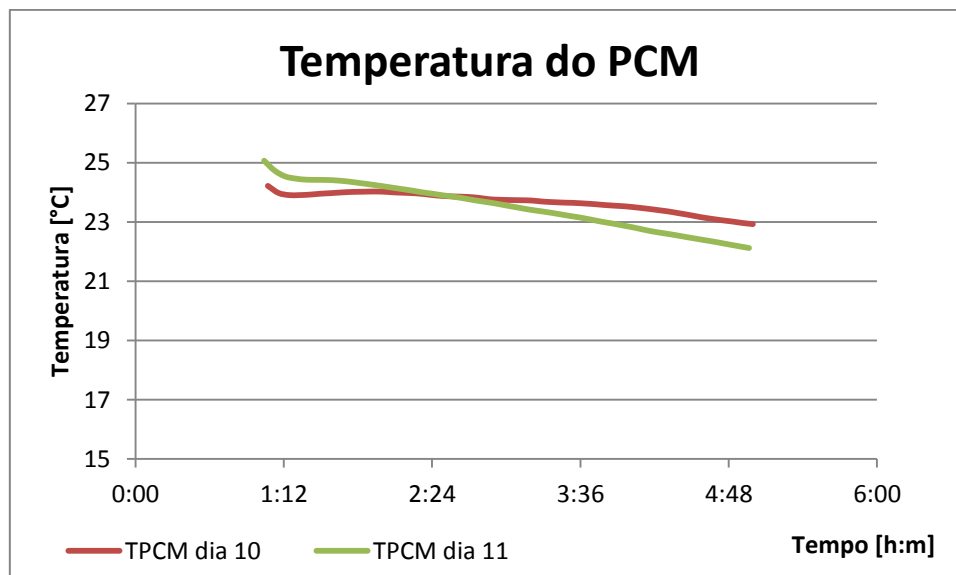
Figura 4.28 – Esquema gráfico de temperaturas, dia 11, Modo 5

É possível verificar em ambos os casos a capacidade de transferência de calor do PCM para o ar. O ar sai sempre da bateria a uma temperatura igual à do PCM (24 °C). No caso do dia 10 o ar sai a uma temperatura superior à do PCM, esse facto pode dever-se ao facto de se utilizar um valor médio da temperatura do PCM.

Em ambos os casos, é possível visualizar também que o processo de descarregamento do PCM para o exterior é de certa forma ineficiente, uma vez que através das temperaturas visíveis se percebe que existem acumulações de ar ou vórtices na zona da saída da bateria e na zona da cavidade de ar. Este fenómeno deve-se novamente à forma do protótipo na zona superior da cavidade de ar. Poderia ter-se criado uma forma de fechar a cavidade de ar neste modo de funcionamento de forma a impedir que o ar se movimentasse para lá.

Sendo assim pode concluir-se que o processo de transferência de calor do PCM para o ar é eficiente, no entanto o processo de expelição desse ar para o exterior não é da mesma forma eficiente.

Com o processo de descarregamento do PCM a temperatura do PCM vai descendo, no entanto, como se pode ver na Figura 4.29, essa descida é feita com um declive relativamente pequeno.



**Figura 4.29 Temperatura do PCM dia 10 e 11, Modo 5**

A justificação reside no facto de o PCM estar na zona de calor latente (entre os 17,5 °C e os 25 °C) e portanto embora esteja a ser retirada energia, este tem tendência para manter a temperatura mais ou menos constante. Seria contante se seguisse uma curva teórica na zona de calor latente.

A eficiência do processo de extracção de calor da bateria para o exterior ( $\eta_{BatExt}$ ) pode perceber-se através da relação entre a temperatura do ar à saída do protótipo e a temperatura do ar à saída da bateria, segundo a expressão:

$$\eta_{BatExt} = \frac{T_{Ar1} - T_{Ar5}}{T_{BateriaSuperior} - T_{Ar5}}$$

A Figura 4.30 representa os valores da eficiência descrita acima, para cada um dos dias.

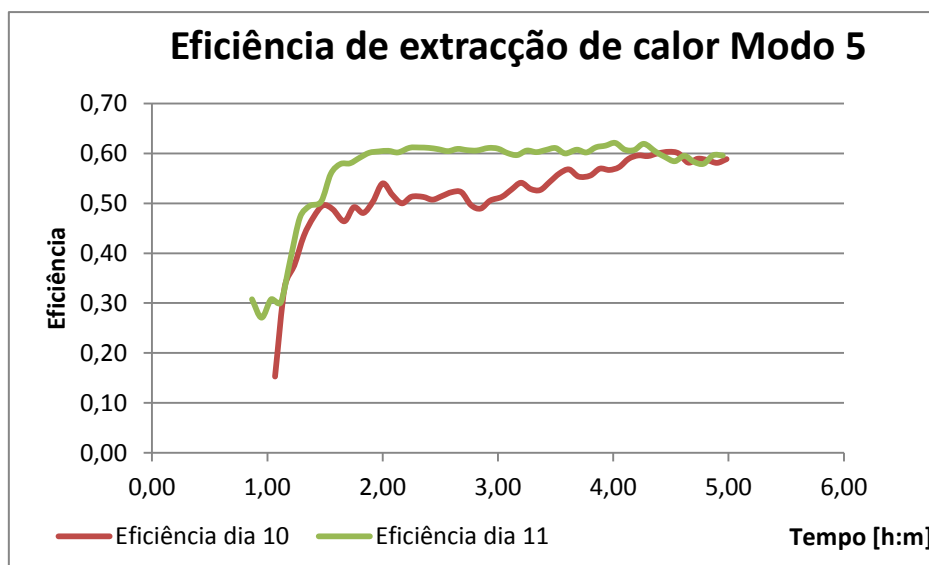


Figura 4.30 – Eficiência de extração de calor, Modo 5

É perceptível que uma boa parte da energia recolhida pelo ar na bateria não chega à saída do protótipo, o que significa que fica dentro do mesmo.

#### 4.5.2 Modo 8, Modo 9 e BIPV-T

Durante o período de inverno o objectivo do sistema assenta em garantir que a energia que chega à parte frontal do protótipo é transferida para o interior da sala.

Durante o verão, o objectivo é exactamente o oposto, transferir energia da sala para o exterior, conceito este que fundamenta o Regime de Verão 1 (subcapítulo 4.1). A particularidade deste regime assenta nos Modos de funcionamento 5 e 6. Durante a noite o Modo 5 descarrega o PCM para o exterior, para que durante o dia o Modo 6 carregue o PCM com energia proveniente da sala.

No entanto, como se poderá perceber ao longo desta análise de verão, este regime mostrou ser de impossível execução uma vez que no período de insolação era elevada a quantidade de energia que fluía da cavidade de ar para a bateria através do isolamento, fazendo com que a temperatura do PCM aumentasse o suficiente para ser superior à temperatura da sala. Sendo assim, em vez de se transferir energia da sala para o PCM, estar-se-ia a transferir energia do PCM para a sala, o que seria incoerente.

Abandonando a ideologia de que se poderia extrair calor da sala com este sistema, acabou por se definir como objectivo de verão, não a extração de energia, mas sim a não penetração da mesma no interior da sala (isolamento). Assim para analisar o sistema durante o verão, calcula-se a relação entre a energia que chega ao sistema e a energia que não entra na sala, uma vez que o que se pretende é que esta não penetre na mesma. A energia produzida pelo PV está incluída nessa quantidade de energia.

Como referido no subcapítulo 4.1, foram testados dois regimes de verão, de forma a fazer-se uma comparação entre ambos. O Regime de Verão 2 engloba o Modo de funcionamento 9, que não possui qualquer ventilação forçada do PV através da cavidade de ar. O Regime de Verão 3 engloba o Modo 8 que tem por objectivo ventilar o PV fazendo fluir ar na cavidade de ar. Sendo assim comparar-se-á o impacto da ventilação no comportamento do sistema.

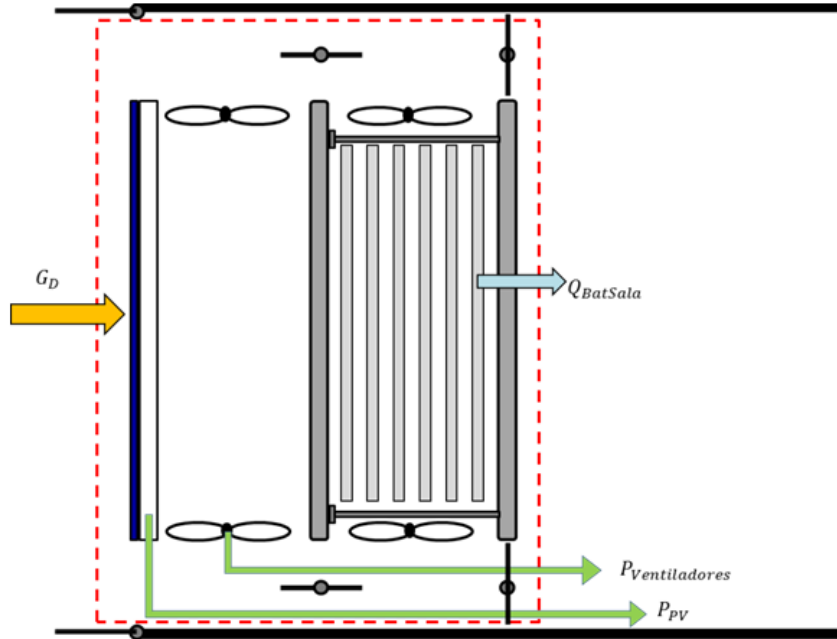


Figura 4.31 – Balanço energético, Verão

Com base no balanço energético geral de verão (Figura 4.31), a eficiência global do Modo 9 (sem ventilação) e do BIPV/T é definida pela expressão:

$$\eta_{\text{Modo 9; BIPV/T}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{\text{BatSala}}}{\dot{G}_D}$$

Para o Modo 8 (com ventilação), é preciso ter também em conta a energia consumida nos ventiladores:

$$\eta_{\text{Modo 8}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{\text{BatSala}} + P_{\text{Ventiladores}}}{\dot{G}_D}$$

As eficiências globais dos Modos 8 e 9, e do BIPVT são apresentadas na Figura 4.32.

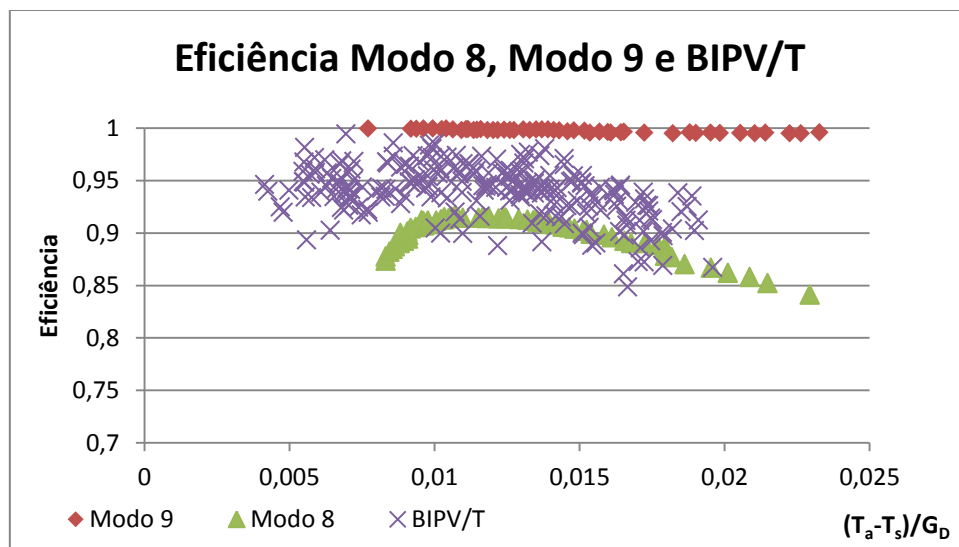


Figura 4.32 – Eficiência, Modo 9, Modo 8, e BIPV/T

Em qualquer um dos casos é notável a elevada eficiência de isolamento da parede durante o período de insolação, uma vez que nunca atinge valores inferiores a 80% da energia que incide no sistema.

O Modo 9, sem ventilação forçada, apresenta a maior eficiência, sempre próxima de 1. A grande descida da eficiência do Modo 8 em relação ao Modo 9 prende-se na quantidade energia que é consumida nos ventiladores. Pela Figura 4.32 pode supor-se que o fluxo de energia para o interior da sala é maior no Modo 8 do que no BIPV/T, o que não é verdade como se poderá perceber mais à frente neste capítulo. O que acontece, como já referido, é que devido à energia consumida pelos ventiladores, a eficiência do Modo 8 desce significativamente.

As eficiências térmicas e eléctricas dos Modos 8 e 9 são definidas por:

$$\eta_{TérmicaModo9} = 1 - \frac{Q_{BatSala} - P_{PV}}{\dot{G}_D}$$

$$\eta_{TérmicaModo8} = 1 - \frac{Q_{BatSala} + P_{Ventiladores} - P_{PV}}{\dot{G}_D}$$

$$\eta_{EléctricaModo8\ e\ 9} = \frac{P_{PV}}{\dot{G}_{D\ PV}}$$

As figuras Figura 4.33 e Figura 4.34 ilustram o comportamento das eficiências térmica e eléctrica do Modo 8 e 9.

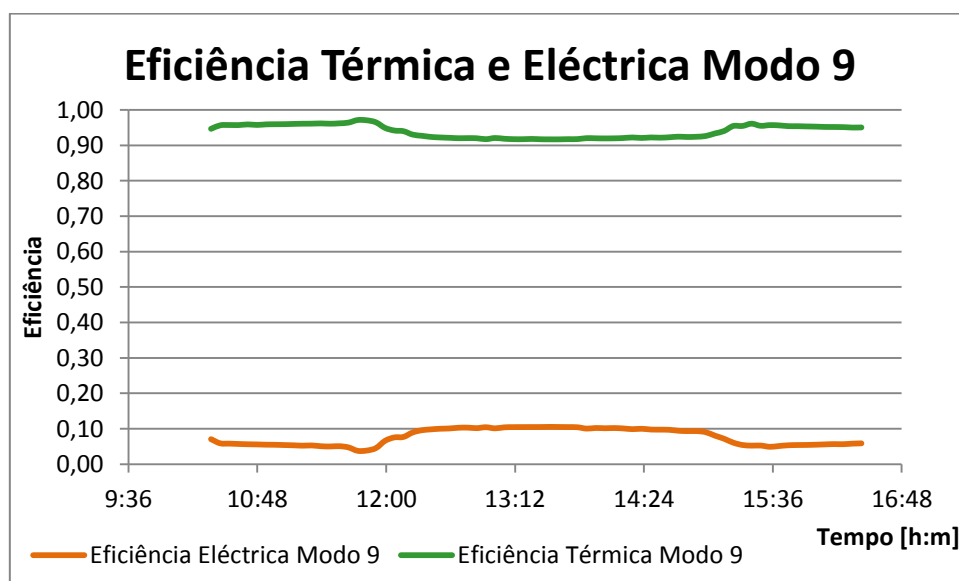


Figura 4.33 – Eficiências Térmica e Eléctrica, Modo 9

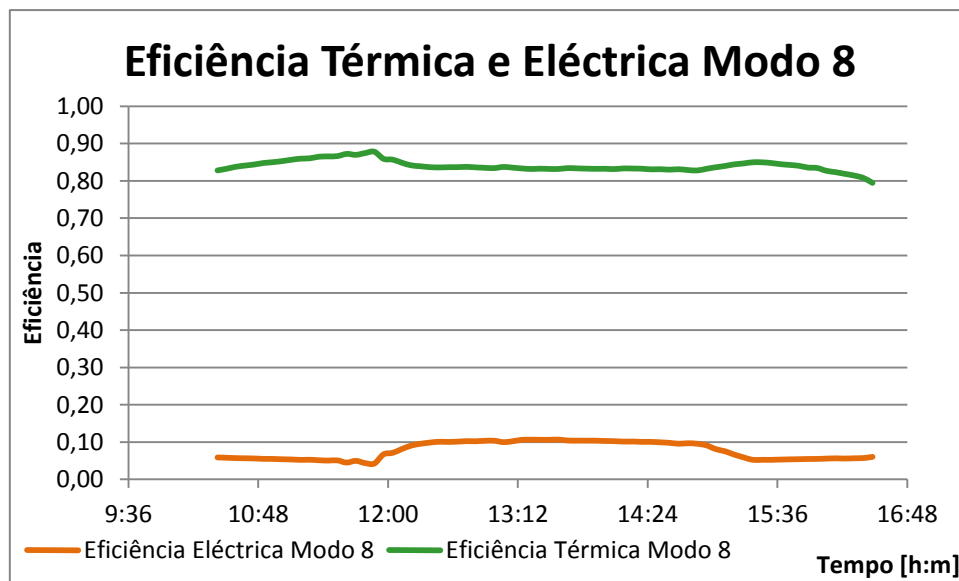


Figura 4.34 – Eficiências Térmica e Eléctrica, Modo 8

O principal objectivo do Modo 8 é a ventilação do PV, com o objectivo de baixar a sua temperatura e assim aumentar a sua eficiência. As figuras Figura 4.35 e Figura 4.36 representam respectivamente a temperatura do PV em função do tempo e a temperatura do PV em função de  $\frac{T_a}{G_D}$ .

Na Figura 4.35 é visível a proximidade das curvas que descrevem a temperatura do PV para ambos os modos de funcionamento, Modo 8 (com ventilação) e Modo 9 (sem ventilação), sendo que ainda assim é possível verificar que é muito mais frequente que a linha vermelha (Modo 9, sem ventilação) se superiorize à linha verde (Modo 8, com ventilação), ou seja, ainda que tenuemente a temperatura do PV é inferior quando se efectua ventilação.

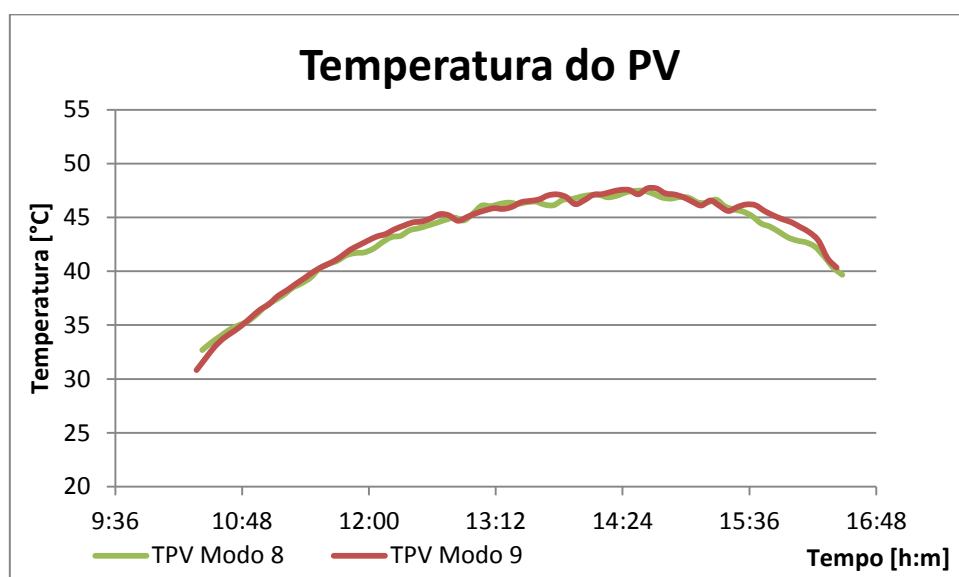


Figura 4.35 – Temperatura do PV, Modo 8 e 9



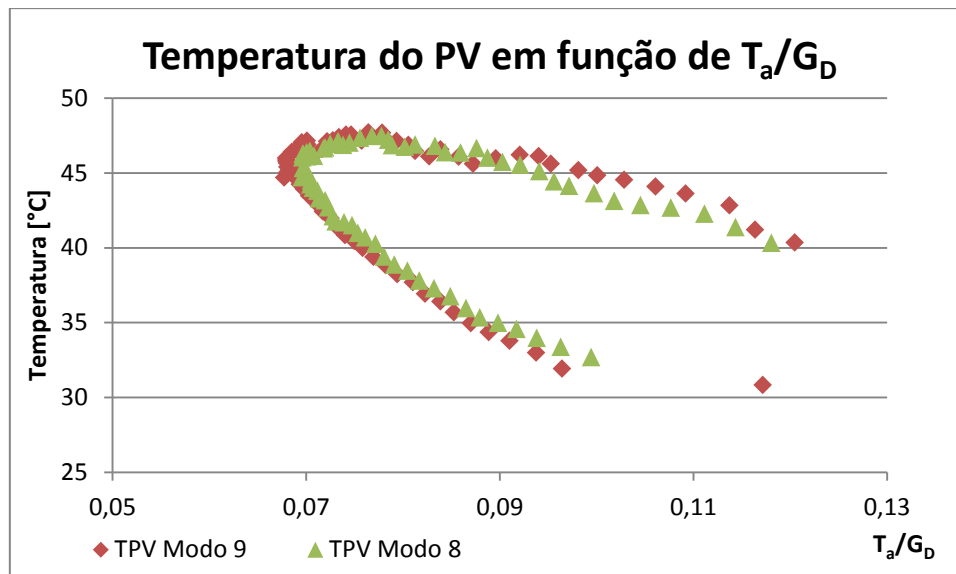


Figura 4.36 – Temperatura do PV em função de  $\frac{T_a}{G_D}$ , Modo 9 e 8

Uma vez que os Modos de funcionamento foram testados em dias diferentes, embora tenham sido dias consecutivos e com condições muito semelhantes, não é possível fazer uma comparação completa e correcta apenas com a temperatura ao longo do período de teste, como foi ilustrado na Figura 4.35. Assim sendo, a Figura 4.36 ilustra graficamente o comportamento da temperatura do PV para os Modos 8 e 9, em função de  $T_a/G_D$ , de forma a poderem ser comparados para condições de irradiância e temperatura ambiente semelhantes.

A Figura 4.36 parece ilustrar um comportamento de histerese do PV, uma vez que, para as mesmas condições, a temperatura comporta-se de forma diferente no período de aquecimento e de arrefecimento. Também nesta ilustração gráfica, no período final de aquecimento e no período de arrefecimento, e para o mesmo valor de  $T_a/G_D$ , é possível verificar que a dispersão a vermelho (Modo 9, sem ventilação) se superioriza à dispersão a verde (Modo 8, com ventilação), ou seja, novamente nota-se que, ainda que tenuemente, a temperatura é superior quando não se efectua ventilação, principalmente na zona de arrefecimento quando  $T_a/G_D$  é superior a 0,09 ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$ ). A diferença entre a temperatura do PV no Modo 8 e 9, para as mesmas condições de  $T_a/G_D$ , chega a atingir 1,5  $^{\circ}\text{C}$ .

Existe ainda outro factor, para além da irradiância e da temperatura ambiente, que pode ter influência na temperatura do PV, a velocidade do vento, que não tendo sido monitorizada não foi possível incluir nesta análise, mas que ainda assim pode ter tido algum impacto na quantidade de calor que é transferida do PV para o exterior por convecção.

Na Figura 4.37 é representado o fluxo de calor para o interior da sala em função de  $\frac{T_a - T_s}{G_D}$ , de forma a fazer uma comparação entre o fluxo de calor que flui para o interior da sala no Modo 9 (sem ventilação), no Modo 8 (com ventilação) e ainda no BIPV/T.

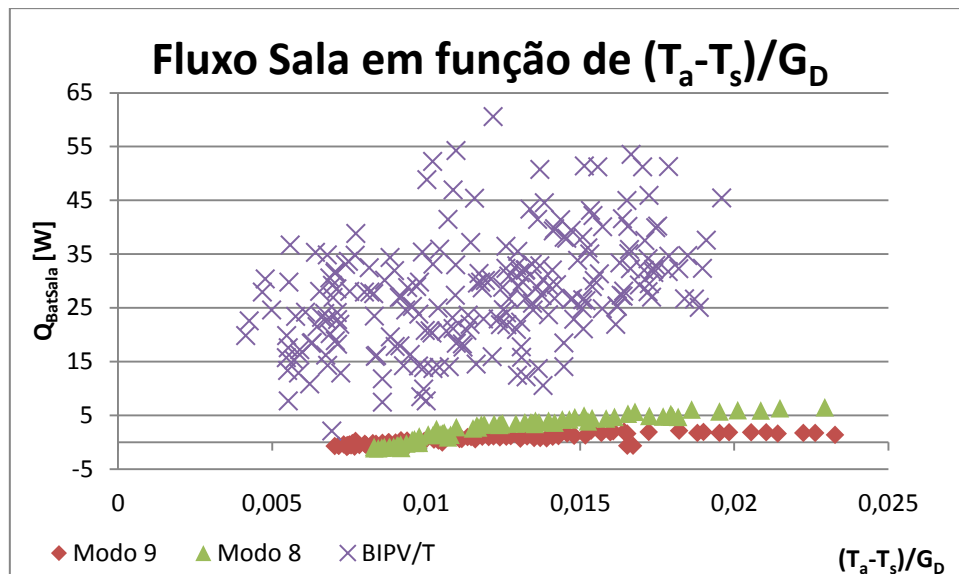


Figura 4.37 – Fluxo de calor para a sala em função de  $\frac{T_a-T_s}{G_D}$ , Modo 8, Modo 9 e BIPV/T

Como já tinha sido enunciado acima, o facto da eficiência do BIPV/T ser superior à do Modo 8 não se deve propriamente à capacidade do BIPV/T reter o calor que flui para a sala, mas sim da ineficiência do Modo 8 ao consumir energia na ventilação, sem que se obtenha um benefício significativo dessa actividade.

É de notar também, que para as mesmas condições, se verifica um maior fluxo por parte do Modo 8, com ventilação forçada, do que no caso do Modo 9, sem ventilação forçada.

Esse fenómeno pode ser percebido através das figuras Figura 4.38 e Figura 4.39, que representam as temperaturas médias em vários sensores, para cada um dos modos de funcionamento.

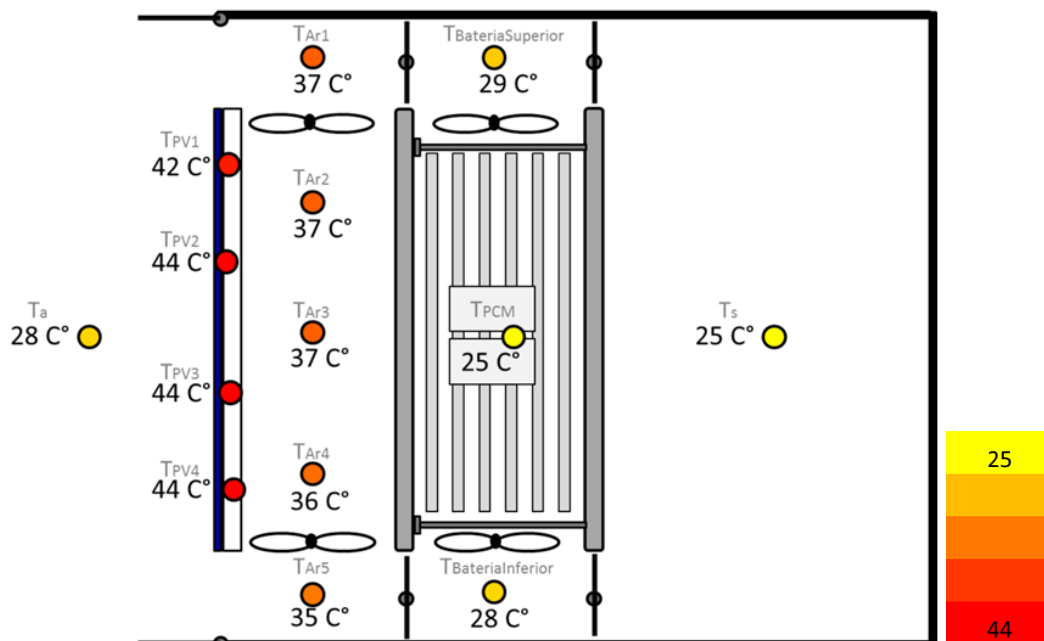


Figura 4.38 – Esquema gráfico de temperaturas, Modo 9 (Inactivo)

No Modo 9 (sem ventilação) a temperatura na cavidade de ar mantém-se a uma temperatura relativamente baixa e constante, quando se compara com as mesmas temperaturas no Modo 8 (com ventilação). É de notar que no Modo 9 (Figura 4.38), existe um pequeno aumento gradual da temperatura na cavidade de ar, que assinala a existência de uma possível ventilação natural devido ao aumento da temperatura do ar na cavidade.

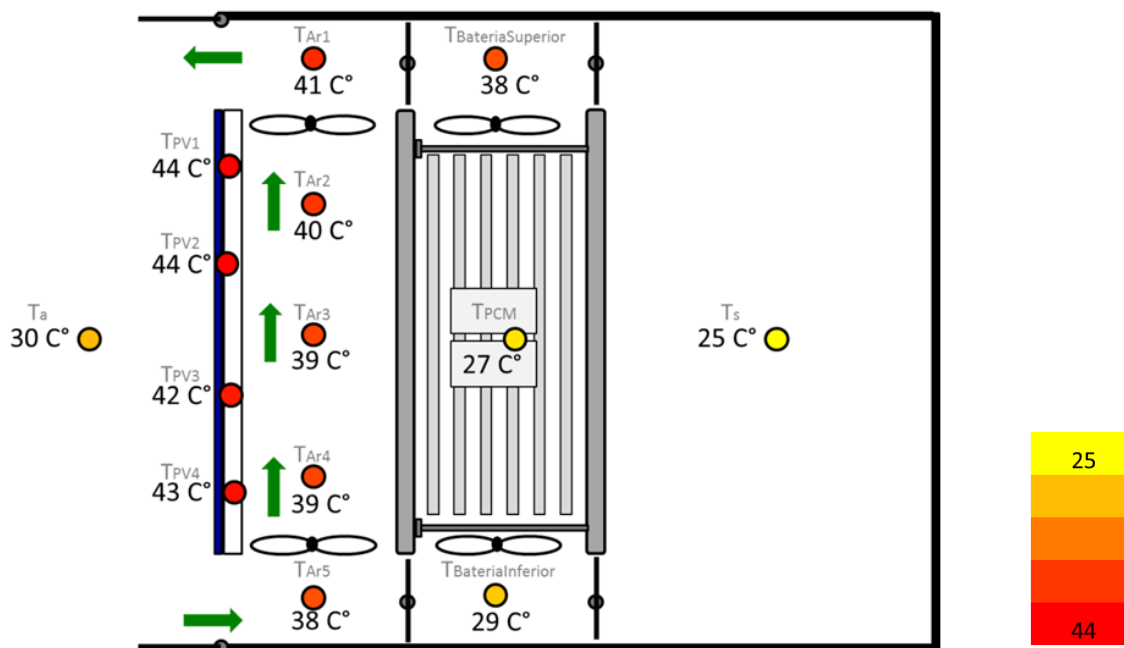


Figura 4.39 – Esquema gráfico de temperaturas, Modo 8 (Ventilação do PV)

No Modo 8 (com ventilação) a temperatura na cavidade de ar atinge temperaturas superiores ao Modo 9 (sem ventilação), com uma diferença entre os 3 °C e os 5 °C, valor esse bastante significativo, e que vai repercutir-se na temperatura do PCM, que sobe cerca de 3 °C em relação ao Modo 9, tornando-se superior à temperatura do ar na sala, promovendo assim o fluxo de calor da bateria para a sala.

É perceptível através da subida gradual da temperatura ao longo da cavidade de ar, que está a ser removida energia do PV, como era previsto. Na Figura 4.40 é representado o fluxo convectivo entre o PV e o ar em função de  $(T_a - T_s)/G_D$ , e pode visualizar-se que a ventilação promove claramente a transferência de calor do PV para o ar, sendo que para as mesmas condições de temperatura ambiente, temperatura da sala e irradiância, o fluxo no PV atinge uma variação de 80W no Modo 9 (sem ventilação) para 120W no Modo 8 (com ventilação). Consequentemente esse escoamento, ao transferir a energia do PV para o ar faz com que o ar fique a uma temperatura elevada, promovendo uma maior transferência de calor para o PCM.

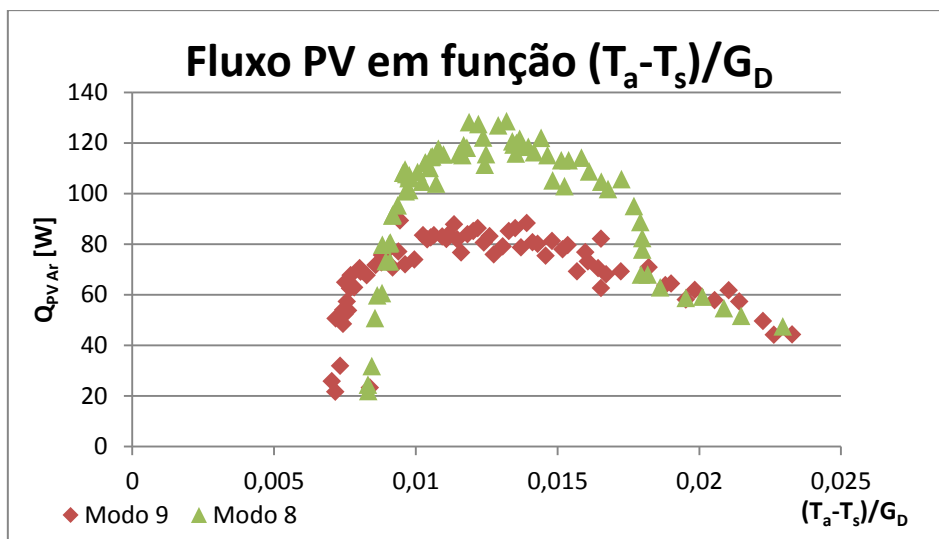


Figura 4.40 – Fluxo de calor do PV para a cavidade de ar em função de  $\frac{T_a - T_s}{G_D}$

A intensidade do fluxo condutivo/convectivo de calor para o interior da sala é um factor importante e pretende minimizar-se. No entanto, não interessa só a intensidade do fluxo, mas sim quando este se verifica mais intenso, isto é, não importa que o fluxo condutivo seja mais intenso, desde que o seja num período de tempo em que não é prejudicial. Esta noção surge no sentido da lógica da utilização do PCM, que com a sua inércia térmica permite translacionar os fluxos de calor para períodos em que esse fluxo tem menos impacto, como o período da noite.

Na Figura 4.41 compara-se o fluxo condutivo/convectivo para a sala no Regime de Verão 2 (Modo 9, sem ventilação), no Regime de Verão 3 (Modo 8, com ventilação) e ainda no BIPV/T. Neste caso utiliza-se o termo Regime e não Modo por se estar a analisar o dia inteiro e não apenas um período.

Como já referido o fluxo no caso do BIPV/T é claramente superior ao do sistema em estudo. No entanto, é possível verificar também, através das linhas de tendência, que o fluxo máximo no caso do sistema em estudo é translacionado para um período mais tardio. No caso do BIPV/T o máximo é atingido às 17:45h, enquanto que no caso dos Regimes de Verão 2 e 3 (Modo 8 e 9), o máximo só é atingido às 19:30, 2 horas e um quarto depois.

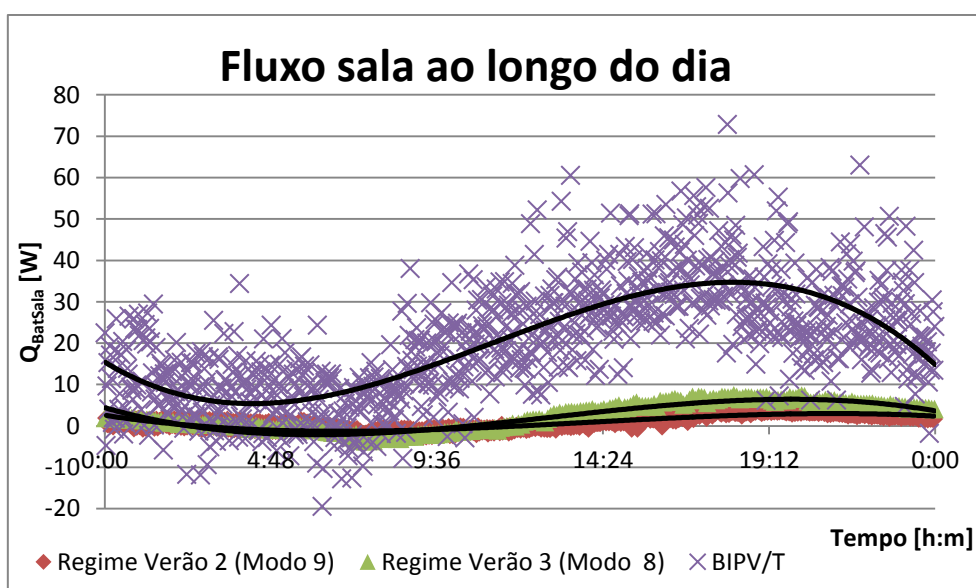


Figura 4.41 – Fluxo para o interior da sala, Regime 4, Regime 5 e BIPV/T

### 4.5.3 Análise energética – Verão

Com base no conceito de eficiência descrita anteriormente, são de seguida analisados energeticamente os dias referentes aos Regimes de Verão 2 e 3 e ao BIPVT.

Os valores energéticos e a eficiência global para o Regime de Verão 2 (Modo 9, sem ventilação) são:

Regime de Verão 2 (Modo 5+Modo 9)					
	$G_D$	$G_{DPV}$	$Q_{BatSala}$	$P_{PV}$	$P_{Vent.5}$
Valor (kJ)	12088	9354	103	748	311

Quadro 4.8 – Valores energéticos, Regime de Verão 2

$$n_{Verão2} = 1 - \frac{Q_{BatSala} + P_{ventiladores}}{G_D} = 1 - \frac{103 \text{ kJ} + 311 \text{ kJ}}{12088 \text{ kJ}} = 0,966$$

A eficiência térmica é:

$$n_{TérmicaVerão2} = 1 - \frac{Q_{BatSala} + P_{ventiladores} + P_{PV}}{G_D} = 1 - \frac{103 \text{ kJ} + 311 \text{ kJ} + 748 \text{ kJ}}{12088 \text{ kJ}} = 0,904$$

A eficiência eléctrica é:

$$n_{EléctricaVerão2} = \frac{P_{PV}}{G_{DPV}} = \frac{748 \text{ kJ}}{9354 \text{ kJ}} = 0,080$$

Os valores energéticos e a eficiência global para o Regime de Verão 3 (Modo 8, com ventilação) são:

Regime de Verão 3 (Modo 5+Modo 8)						
	$G_D$	$G_{DPV}$	$Q_{BatSala}$	$P_{PV}$	$P_{Ventiladores}$	
					$P_{Vent.5}$	$P_{Vent.8}$
Valor (kJ)	12237	9469	211	769	311	467

Quadro 4.9 – Valores energéticos, Regime de Verão 3

$$n_{RegimeVerão3} = 1 - \frac{Q_{BatSala} + P_{ventiladores}}{G_D} = 1 - \frac{211 \text{ kJ} + (467 \text{ kJ} + 311 \text{ kJ})}{12237 \text{ kJ}} = 0,919$$

A eficiência térmica é:

$$n_{TérmicaVerão3} = 1 - \frac{Q_{BatSala} + P_{ventiladores} + P_{PV}}{G_D} = 1 - \frac{211 \text{ kJ} + (467 \text{ kJ} + 311 \text{ kJ}) + 769 \text{ kJ}}{12237 \text{ kJ}} = 0,856$$

A eficiência eléctrica é:

$$n_{EléctricaVerão3} = \frac{P_{PV}}{G_{DPV}} = \frac{769 \text{ kJ}}{9469 \text{ kJ}} = 0,081$$

Os valores energéticos e a eficiência global para o BIPV/T são:

BIPV/T		
	$G_D$	$Q_{BatSala}$
<b>Valor (kJ)</b>	12237	2143

Quadro 4.10 – Valores energéticos, BIPV/T

$$n_{BIPVT} = 1 - \frac{Q_{BatSala}}{G_D} = 1 - \frac{2143 \text{ kJ}}{12237 \text{ kJ}} = 0,825$$

Pode concluir-se que o sistema em estudo possui uma eficiência no verão superior à eficiência do BIPV/T, uma vez que no Modo 8 e 9 detém eficiências de 96,6% e 91,9% respectivamente, enquanto que o BIPVT apenas atinge os 82,5%.

Quanto aos dois modos testados, como foi descrito sucintamente ao longo do capítulo, o Modo 9, sem ventilação forçada, é mais eficiente com uma diferença na eficiência de 4,7%. O Modo 8 peca por dois aspectos, por um lado ao ventilar o PV promove maior fluxo de calor para o ar, aumentando assim o fluxo de calor para a sala. Por outro lado o facto de consumir energia eléctrica nos ventiladores sem obter disso um aumento significativo na eficiência eléctrica faz com que a eficiência global desça.

A ventilação forçada do PV (Modo 8) mostrou conseguir obter um decréscimo na temperatura do mesmo, no entanto o impacto dessa diminuição da temperatura do PV apenas correspondeu a 0,1% de aumento na eficiência (a eficiência eléctrica do Modo 9 correspondeu a 8% enquanto que a eficiência eléctrica do Modo 8 correspondeu a 8,1%), o que não é suficiente para compensar que se consuma energia nos ventiladores.

Pode-se considerar que o Modo 9 possui uma eficiência elevada segundo a definição de eficiência utilizada, que se baseia no isolamento da sala, uma vez que só passa para o interior uma quantidade de energia equivalente a 0,8% da energia que chega à parte frontal do sistema, como se pode confirmar através da expressão:

$$\frac{Q_{BatSala}}{G_D} = \frac{103 \text{ kJ}}{12088 \text{ kJ}} = 0,008$$

É de evidenciar também que durante a noite, quando o PCM está a ser descarregado, existe um fluxo da sala para o sistema.

## 4.6 Análise de balanço energético térmico de aplicação do sistema a uma sala

De forma a entender melhor a capacidade que o sistema em estudo tem de perfazer as necessidades energéticas de aquecimento de um edifício real, efectuou-se a seguinte análise de balanço energético aplicado a uma sala.

Segundo um estudo efectuado pelo Instituto Nacional de Estatística em parceria com a Direcção Geral de Energia e Geologia em 2011, nomeado “Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010” [21], o consumo por área aquecida numa habitação anualmente é de  $0,0037 \text{ tep/m}^2$ , sendo que consideram que em quatro meses existe aquecimento da habitação.

Admitindo uma quantidade de energia consumida para aquecimento semelhante nos quatro meses, e sabendo que 1GWh equivale a 86 tep, a energia consumida num dia por metro quadrado será:

$$E_{consumida(dia)} = \frac{\left( \frac{0,0037 \frac{\text{tep}}{\text{m}^2} * 3600 \text{ GJ}}{86 \text{ tep}} \right)}{4 \text{ meses} * 30 \text{ dias}} = 1291 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$$

Para uma sala de 3 por 4 metros, ou seja, uma área de  $12 \text{ m}^2$ , a energia consumida será:

$$E_{consumida(dia)} = 1291 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m}^2 = 15492 \text{ kJ}$$

Segundo a análise energética de inverno do sistema em estudo, presente no subcapítulo 4.4.4, a energia útil que o sistema emprega durante um dia no aquecimento da sala é 3851 kJ (2994 kJ referentes ao  $Q_{Vsala2}$ , 611 kJ referentes ao  $Q_{Vsala3}$  e 246 kJ referentes ao  $Q_{BatSala}$ ).

Sendo assim, e assumindo o comportamento do sistema com base apenas no dia analisado, a relação entre a energia útil e a energia consumida é dada por:

$$R = \frac{E_{consumida(dia)}}{E_{\acute{u}til}} = \frac{15492 \text{ kJ}}{3851 \text{ kJ}} \approx 4$$

A relação entre a energia útil e a energia consumida é igual a 4, o que significa que para a sala ser auto-suficiente termicamente durante o período de aquecimento, tendo em conta o dia analisado e as condições admitidas anteriormente, a sala teria que possuir 4 sistemas BIPV/T-PCM.

Uma vez que o sistema possui um tamanho de 1,68 m de comprimento e 0,74 m de altura, e que a parede virada a sul da sala terá 3 m e uma altura de 3 m, é possível verificar na demonstração abaixo que é possível a aplicação de uma ampliação deste sistema, uma vez que a altura da sala é mais de quatro vezes superior à altura do sistema.

$$Altura_{Sala} > R * Altura_{Sistema}$$

$$3 \text{ m} > 4 * 0,74 \text{ m}$$

$$3 \text{ m} > 2,96 \text{ m}$$

Sabendo que o comprimento do sistema é de 1,68 m, e que a parede virada a sul da sala tem 3 m de comprimento, sobra ainda 1,32 m, suficientes para a colocação de uma janela.





## 5. Gestão e Optimização do Sistema

### 5.1 Gestão energética do sistema

A capacidade mais notória do sistema em estudo é nitidamente a sua versatilidade, uma vez que é composto pelos elementos necessários para que se possa operar o seu comportamento em função das condições da envolvente, essa capacidade deve-se aos diferentes modos de funcionamento que são propostos. Dessa forma, este conceito é um sistema claramente activo, uma vez que depende da alteração dos modos de funcionamento para que funcione eficientemente.

Para além da versatilidade do sistema, ou seja, a sua capacidade de alteração de objectivo, é complementarmente importante que a gestão dos modos de funcionamento, ou gestão energética do sistema, seja efectuada de forma eficiente. Uma vez que a selecção dos modos de funcionamento depende das condições da envolvente, como as temperaturas dos elementos do sistema, as temperaturas interior e exterior, ou a irradiância, caso essas condições se alterem o sistema deve alterar também a sua resposta de forma a que seja sempre o mais eficiente possível.

Assim, a gestão energética deste sistema depende manifestamente da operação correcta dos modos de funcionamento. A solução para esta problemática passa por automatizar os elementos activos do sistema (comportas, gavetas e ventiladores), e implementar um código lógico de gestão dos modos de funcionamento que se baseia na comparação das temperaturas dos elementos do sistema (como o PV e o PCM) com as temperaturas interior e exterior, e com a irradiância.

Os ensaios realizados na presente dissertação foram efectuados apenas com recurso à operação manual do sistema. Não sendo possível a análise instantânea das condições envolventes definiu-se horários predefinidos para a alteração dos modos de funcionamento, sujeitando assim o sistema a uma possível gestão ineficiente.

Em algumas situações é de fácil exemplificação a forma como uma resposta não adequada às condições da envolvente pode significar uma ineficiente gestão energética. Na análise experimental (Capítulo 4), ao estudar o comportamento do Modo 1 pôde verificar-se que o facto de o sistema ter sido operado manualmente comprometeu a eficiência do mesmo (Figura 5.1).

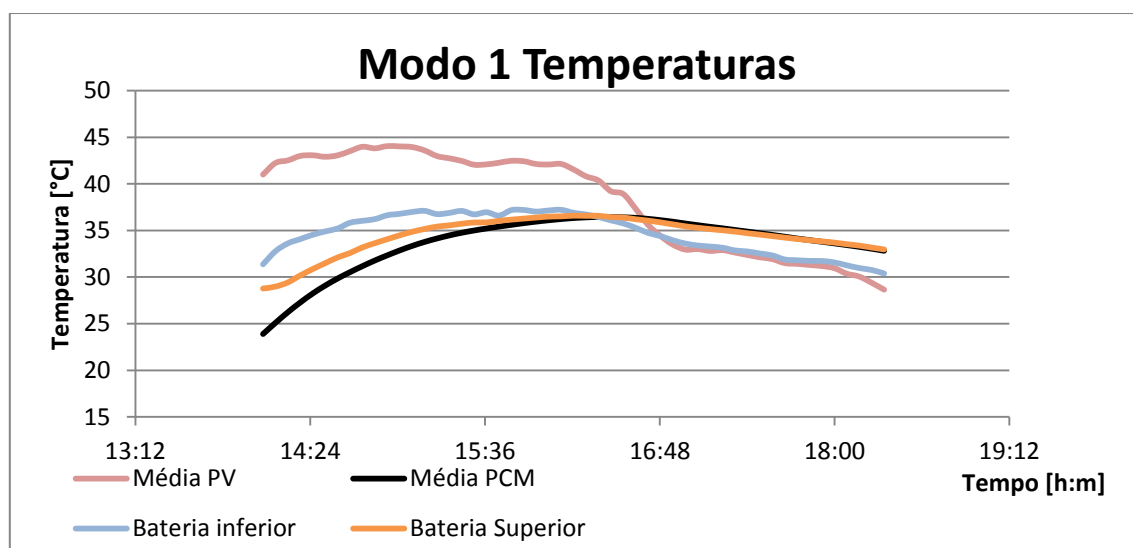


Figura 5.1 - Temperaturas , Modo 1

O objectivo do Modo de funcionamento 1 tem por objectivo transferir energia do PV para a bateria de PCM, carregando assim a bateria. Para tal acontecer a temperatura do PV tem que ser superior à temperatura do PCM, o que se verificou até cerca das 16:30h (Figura 5.1). A partir desse momento, que corresponde com a máxima temperatura do PCM (36°C), a temperatura do PV passa a ser inferior à temperatura do PCM, como é ilustrado na Figura 5.2, promovendo assim um efeito contrário ao previsto, ou seja, a bateria de PCM passa a ser descarregada em vez de carregada.

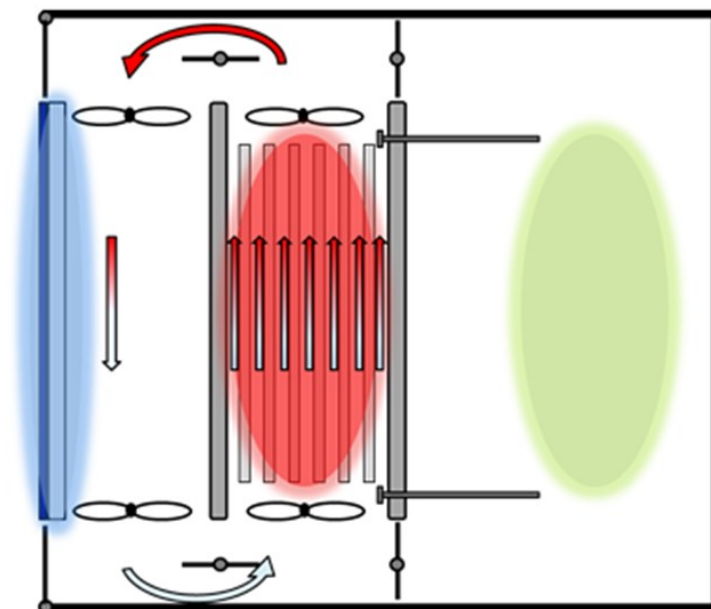


Figura 5.2 – Modo 1, Funcionamento ineficiente

Este tipo de situações, em que é feita uma gestão ineficiente, podem surgir noutros modos de funcionamento, como é exemplificado nas figuras Figura 5.3 e Figura 5.4.

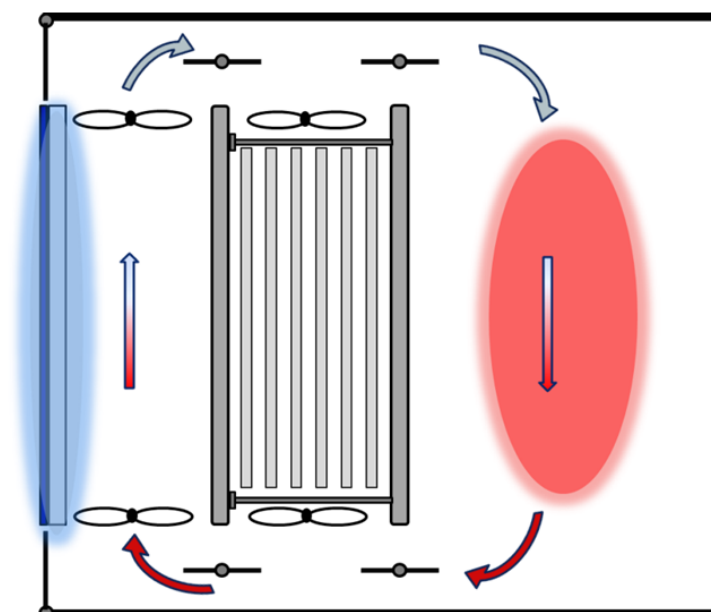


Figura 5.3 – Modo 2, Funcionamento ineficiente

O Modo de funcionamento 2 tem por objectivo transferir calor do PV para o interior da sala, e portanto a temperatura do PV tem que ser superior à temperatura do interior da sala. Na Figura 5.3 é ilustrado o caso característico do fim do dia, isto é, durante o período de insolação a temperatura do PV é superior à temperatura da sala, no entanto, à medida que a irradiância vai descendo no fim do dia, a temperatura do PV desce passando a ser inferior à da sala, e caso o Modo 2 não seja desligado a passasse a transferir energia da sala para o PV.

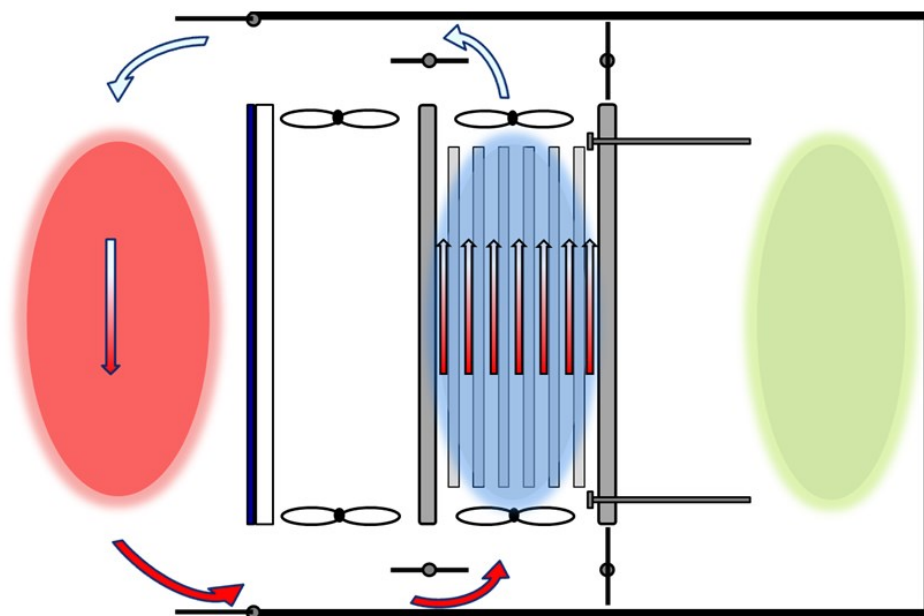


Figura 5.4 – Modo 5, Funcionamento ineficiente

O Modo de funcionamento 5 tem por objectivo transferir energia do PCM para o exterior durante o período nocturno. Caso este não seja desligado antes do nascer do sol, a temperatura exterior aumenta, e passa a transferir-se energia do exterior para o PCM.

Como já referido, para que se possa efectuar a correcta gestão energética do sistema, é necessário que os elementos activos (comportas, gavetas e ventiladores) sejam automatizados de forma a que possam ser comandados por autómato sem a necessidade de operação de um ser humano. Para além disso é necessário que as temperaturas dos elementos do sistema, as temperaturas interior e exterior, e ainda a irradiância, bem como outras, sejam conhecidas, para que se possa comparar essas medidas de forma ao autómato conseguir segundo um código lógico escolher o modo de funcionamento mais adequado. No presente trabalho foi efectuada toda a automatização do sistema, como se será descrito mais à frente no capítulo 5.3. Devido a problemas técnicos não foi possível, ainda no decorrer deste trabalho, fazer a instalação dos sensores de temperaturas. No entanto, desenvolveu-se um possível código lógico de optimização da gestão energética a ser utilizado.

## 5.2 Código lógico de optimização da gestão energética

Como foi referido no subcapítulo anterior, desenvolveu-se código lógico de optimização da gestão energética, sendo que este é apenas uma proposta uma vez que não foi implementado.

Este código é baseado em quatro sensores principais de temperatura para tomar decisões, embora no cálculo da eficiência dos modos, que é um factor utilizado no código, ele possa ter em causa outros indicadores, como por exemplo a irradiância ou até outras temperaturas. Os sensores de temperatura e a sua posição são ilustrados na Figura 5.5, e são: a temperatura ambiente; temperatura do PV; a temperatura do PCM; e a temperatura da sala.

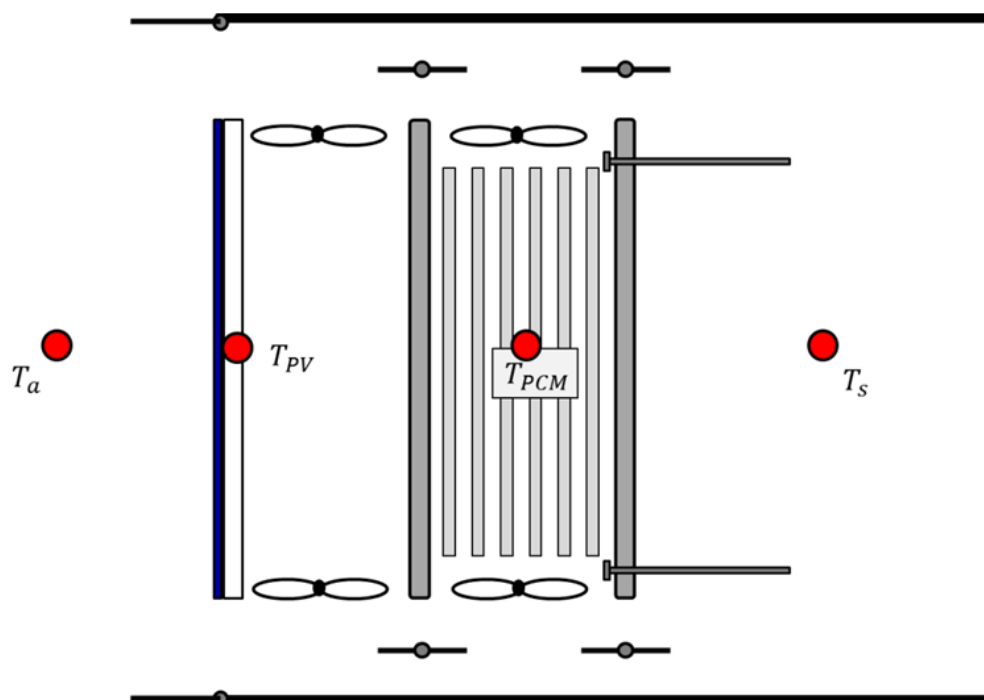


Figura 5.5 – Sensores de temperatura que fundamentam a gestão energética

O código de gestão tem como primeiro passo uma subrotina denominada Estação. A sua função é, através da comparação entre algumas temperaturas, com base em dados de 5 dias, permitir determinar em que estação se está, se no inverno, se no verão. O número de dias no qual a decisão da estação do ano é baseada pode ser aumentado se se quiser maior precisão. O objectivo de tomar esta decisão com base num grupo de dias, é despistar as oscilações que possam ocorrer nas condições climáticas, levando o sistema a pensar por exemplo que num dia muito solarengo de inverno, se está no verão. A subrotina Estação é ilustrada na Figura 5.6.

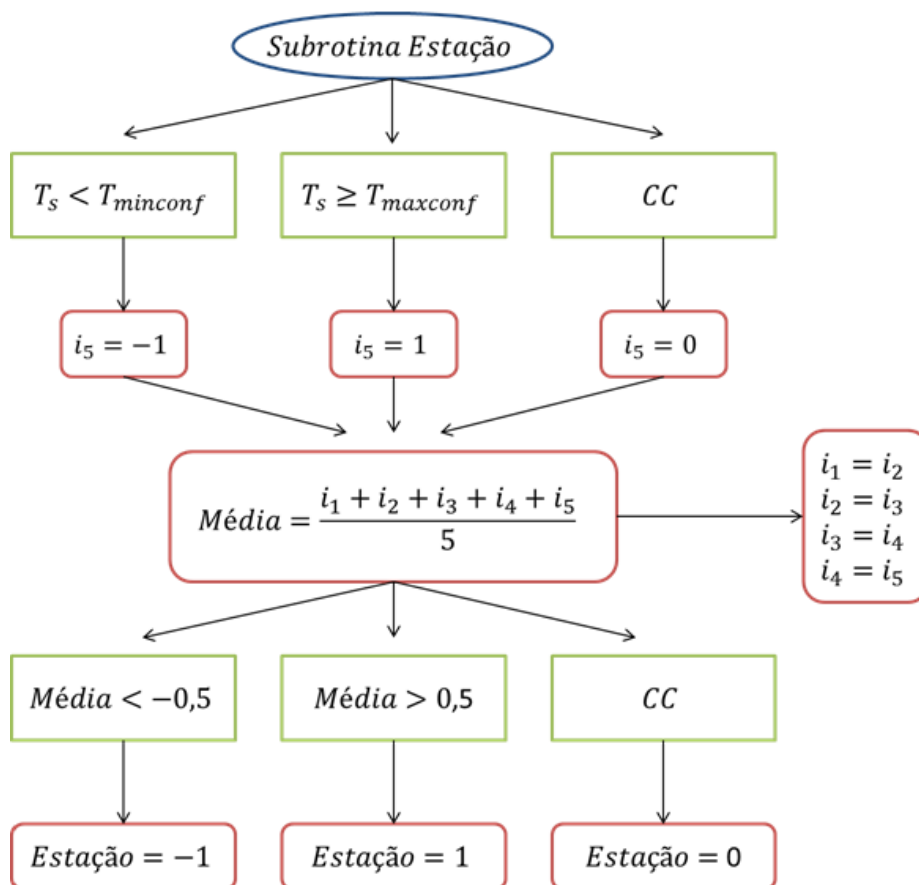


Figura 5.6 – Subrotina Estação

Aparecem nesta subrotina dois novos elementos que não foram ainda apresentados, o  $T_{minconf}$  e o  $T_{maxconf}$ . Definiu-se que o utilizador teria que escolher um intervalo de temperaturas nas quais se sente confortável, são chamadas a temperatura mínima de conforto ( $T_{minconf}$ ) e a temperatura máxima de conforto ( $T_{maxconf}$ ). Com base neste intervalo definido pelo utilizador, admitiu-se que se predominantemente durante esse dia a temperatura da sala é inferior à temperatura mínima de conforto, então o programa admite-o como um dia de inverno. Se predominantemente a temperatura da sala é superior à temperatura máxima de conforto então o programa admite-o como um dia de verão. Caso contrário, ou seja, caso não se verificasse nenhum dos casos anteriores, admite-se que é um dia de meia estação, no qual a temperatura se encontra no intervalo de temperaturas de conforto. O indicador  $i_5$  armazena a informação referente à designação que foi dada a esse dia. Se o dia foi nomeado como um dia de inverno, o indicador armazena o número -1, se for um dia de verão armazena o número 1, se for meia estação armazena o valor 0. O esquema utilizado para a designação das estações é ilustrado na Figura 5.7.

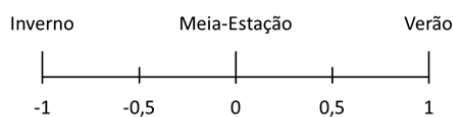








Figura 5.7 – Escala das estações do ano

Os símbolos utilizados na ilustração da subrotina Estação e no esquema que será apresentado a seguir são legendados no Quadro 5.1.

Símbolo	Designação Programática	Observações
		Subrotina ou Programa Principal
	If/else if	Se a condição se verificar segue esse rumo
	Else	Se nenhuma das outras condições se verificar segue esse rumo
		Operador – Armazena valores em variáveis, ou faz cálculos
		Actuador – Faz actuar um dos modos de funcionamento
		Linha de retorno ao início, caso não se verifica a condição, e não há outra hipótese

Quadro 5.1 – Legenda das figuras Figura 5.6 e Figura 5.8

Após ser definido o valor a dar a  $i_5$ , o programa faz a média entre os valores dos quatro dias anteriores, de forma a ter um valor menos oscilante. Ao mesmo tempo atribui às variáveis  $i_x$ , o valor armazenado em  $i_{x+1}$ , deixando assim livre o  $i_5$ , que fica disponível para o dia seguinte, e ainda assim não perdendo os valores dos dias anteriores, excepto o mais antigo de todos.

Se a média for inferior a -0,5 então considera-se que se está ainda no inverno, se for superior a 0,5 considera-se que se está no verão, e se estiver entre -0,5 e 0,5 considera-se a meia estação.

A importância da subrotina Estação está no facto de se utilizarem os valores dos dias anteriores para tomar uma decisão para o presente dia, acerca do qual não se têm ainda valores, ou seja, quer definir-se se o dia em causa é de inverno ou verão, mas ainda não se tem os valores desse dia, então é preciso basear-nos nos dados dos dias anteriores.

É importante referir, embora não esteja representado, que a subrotina Estação armazena também o estado anterior da variável Estação, ou seja, o estado anterior a ter aquele valor. O objectivo é saber se por exemplo quando muda para meia estação, veio do período de verão ou de inverno. Essa variável é representada por  $Estação_{-1}$ .

No programa principal, designado cérebro, o primeiro passo realizado é saber que estação é assumida, valor esse obtido na subrotina anterior.

É importante referir que o programa é lido da esquerda para a direita, ou seja, a primeira hipótese em séries de “if” é sempre a da esquerda, indo posteriormente deslocando-se para a direita.

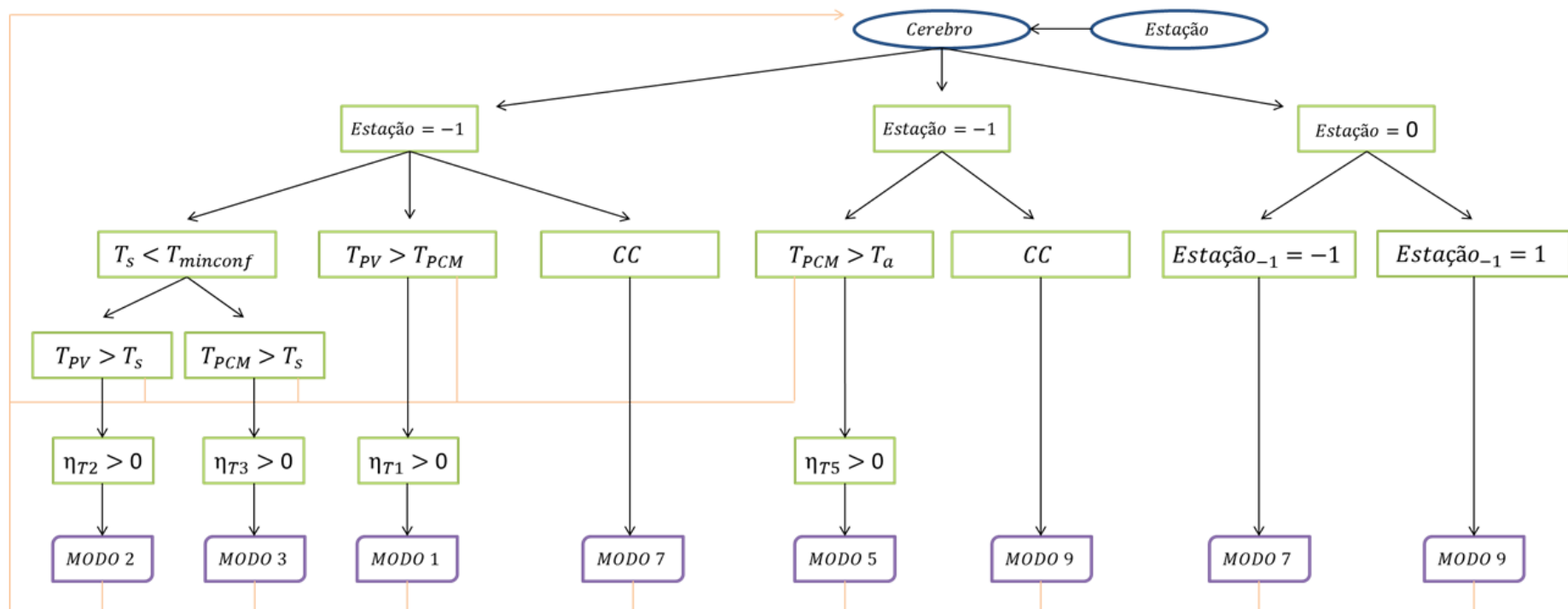


Figura 5.8 – Programa de gestão energética



Se a variável Estação for igual a -1, ou seja, inverno, o sistema verifica primeiro se a temperatura da sala está inferior à temperatura de conforto, ou seja, se existe necessidade de aquecimento. Se se verificar essa necessidade, o sistema verifica se a temperatura do PV é superior à da sala e activa o Modo 2, optando primeiro pelo aquecimento directo, que é o mais eficiente. Caso não se verifique parte para a segunda hipótese, verificando se a temperatura do PCM é superior à temperatura da sala, ou por outras palavras se o PCM está carregado, ligando o Modo 3 caso se verifique.

No caso de não existir necessidade de aquecimento, mas a temperatura do PV seja superior à do PCM então o sistema aproveita para carregar a bateria de PCM, activando o Modo 1.

Se nenhuma das condições anteriores se verificar, o sistema mantém-se no estado inactivo de inverno, o Modo 7.

Este sistema de gestão energética apenas funcionará se o comportamento do protótipo for muito bem conhecido. Na análise experimental foram mostrados alguns gráficos da eficiência dos modos de funcionamento em função de alguns factores, como por exemplo o  $\frac{T_a - T_s}{G_D}$ . Assim, todos os modos de funcionamento, excepto os inactivos, teriam que ser estudados mais aprofundadamente, de forma a conhecer a sua eficiência em função desses factores, num grande leque de circunstâncias possíveis. Esses factores serão diferentes consoante o modo de funcionamento.

Assim, definiu-se que antes de activar qualquer um dos modos de funcionamento, é verificado se a eficiência térmica do mesmo é superior a zero, para garantir que de facto se está a tirar partido daquele modo de funcionamento, e não a consumir-se energia sem fundamento.

Terá que existir portanto uma curva de eficiência térmica para cada modo de funcionamento, em função dos factores externos. A razão pela qual se verifica apenas a eficiência térmica e não a global apoia-se no facto de se poder estar a tomar uma decisão ineficiente, uma vez que a componente eléctrica, produzida pelo PV, pode estar a colmatar a ineficiência da componente térmica, mantendo a eficiência total acima de zero, mas não estando a ser o mais eficiente possível.

Analisando agora o caso em que a variável Estação indica que o período é o verão. O sistema verifica primeiro se a temperatura do PCM é superior à temperatura do ar ambiente, ou seja, procura saber se se encontra no período nocturno. Caso isso se confirme, o sistema verifica se o Modo de funcionamento 5 está dentro dos parâmetros de eficiência térmica superior a zero, e activa-o se se verificar essa condição. Caso contrário, o sistema mantém-se no estado inactivo de Verão, no Modo 9, que como se avaliou na análise experimental mostrou ser o mais eficiente durante essa estação.

No caso de o sistema avaliar que se encontra na meia estação, então verifica se a estação que tem estado activa é a estação de inverno ou de verão, optando assim pelo estado inactivo de inverno ou de verão, Modo 7 e Modo 9, que são iguais, excepto no estado da comporta exterior.

Uma vez que, como já se referiu, as comportas exteriores se mantiveram manuais, uma vez que se consideraram sazonais, o sistema poderá ainda criar um alerta quando detecta que a estação mudou, avisando assim o utilizador que tem que abrir ou fechar as comportas exteriores.

### 5.3 Automatização

O sistema em estudo nesta dissertação, como tem sido referido neste capítulo, embora fosse já dinâmico devido aos vários modos de funcionamento que possui, não tem a possibilidade de funcionar de forma otimizada por ter que ser operado manualmente. Nesse sentido, de forma a dar resposta a este problema, decidiu-se realizar a primeira parte da optimização do sistema, automatizando os elementos activos do mesmo.

Esta automatização consistiu na colocação de actuadores, como motores para fazer a abertura e fecho das comportas e gavetas, e relés para ligar e desligar os ventiladores.

Como referido no subcapítulo 5.1 previu-se instalar sensores de temperatura para que se pudesse utilizar o código lógico e assim comandar de forma optimizada o sistema, no entanto devido a problemas técnicos não foi possível realizá-lo no decorrer deste trabalho.

Embora não se tenha desenvolvido a totalidade das tarefas necessárias para o funcionamento do sistema de forma automatizada (actuadores e outros componentes) e optimizada (sensores de temperatura e código de optimização), decidiu-se avançar com a primeira parte do trabalho, a automatização. Ainda assim, a automatização serviu para que se pudessem programar os modos de funcionamento a certas horas previstas e nas quais era menos acessível ir mudar o modo de funcionamento, modos nocturnos.

O protótipo possui, como já foi referido anteriormente, vários elementos activos que permitem a mudança de modo de funcionamento (Figura 5.9 e Figura 5.10). De modo a automatizar o protótipo, colocaram-se actuadores nos seguintes componentes:

- a) Comporta central inferior e superior;
- b) Comporta interior inferior e superior;
- c) Gavetas isoladoras da bateria;
- d) Ventiladores da bateria;
- e) Ventiladores da cavidade de ar.

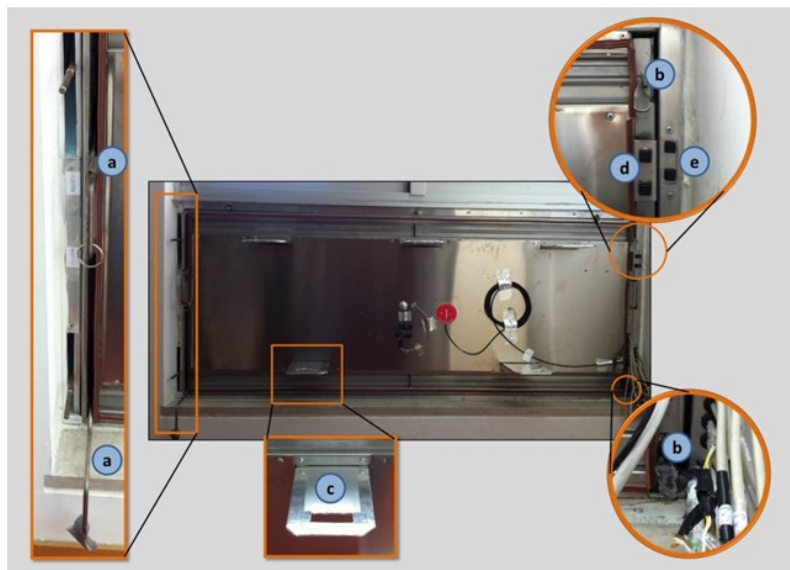


Figura 5.9 – Actuadores do sistema, parte interior

Todos os elementos activos do protótipo foram automatizados excepto as comportas exteriores inferior e superior **f)** (Figura 5.10), por se ter chegado à conclusão que estas eram um elemento activo sazonal, uma vez que durante o verão estão sempre abertas e durante o inverno estão sempre fechadas, como é explicado no capítulo anterior. Para além disso em termos práticos, a colocação de actuadores, como motores, no exterior seria mais problemática que no interior, uma vez que se teria que criar um componente de protecção contra as condições mais adversas do exterior. É de referir que o facto de se ter optado pela não automatização deste elemento activo poderá ser mais problemático na altura de primavera e outono em que as condições são mais instáveis, e aí é mais difícil definir em que altura sazonal se está.



**Figura 5.10 – Actuadores do sistema, parte exterior**

O material utilizado na automatização do protótipo e a sua função são descritos de seguida.

### **5.3.1 Actuadores**

#### **5.3.1.1 Motor passo-a-passo**

Função: Foram utilizados em **a)** e **b)**. No caso das comportas centrais foi utilizado um motor de passo para cada uma das mesmas (Figura 5.11), uma vez que a alavanca era demasiado pesada para o motor conseguir mover ambas. No caso das comportas interiores, utilizou-se um componente mecânico que une a alavanca da comporta inferior à alavanca da comporta superior, permitindo assim que ambas sejam movidas por apenas um motor de passo (Figura 5.11). Os motores de passo movem as alavancas das comportas através de uma fita, que ao ser enrolada/desenrolada no seu eixo abre ou fecha as mesmas.

Quantidade: 3

Características Técnicas	
Número de fases	2
Tensão nominal	12 V
Corrente nominal	0,33 A
Ângulo de passo	1,8 °
Torque	2,3 kg.cm

Quadro 5.2 – Características técnicas, Motor passo-a-passo

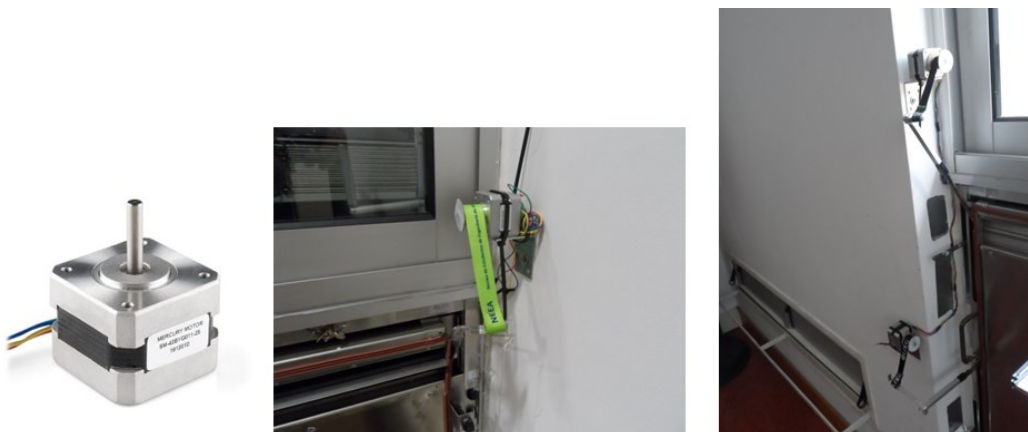


Figura 5.11 – Motor de passo, Motor de passo em b), Motor de passo em a)

### 5.3.1.2 Servomotor

Função: Foram utilizados nas gavetas isoladoras da bateria, **c)**. Através de uma roda acoplada ao servomotor (Figura 5.12), colocando a mesma em contacto com a gaveta, esta é movida por meio do atrito entre a roda e a própria gaveta (Figura 5.13).

Quantidade: 5

Características Técnicas	
Tensão	4,8 a 6,0 V
Corrente	0,98 a 1,10 A
Torque	5 a 6 kg.cm
Rotação	180 °

Quadro 5.3 – Características técnicas, Servomotor



Figura 5.12 – Servomotor

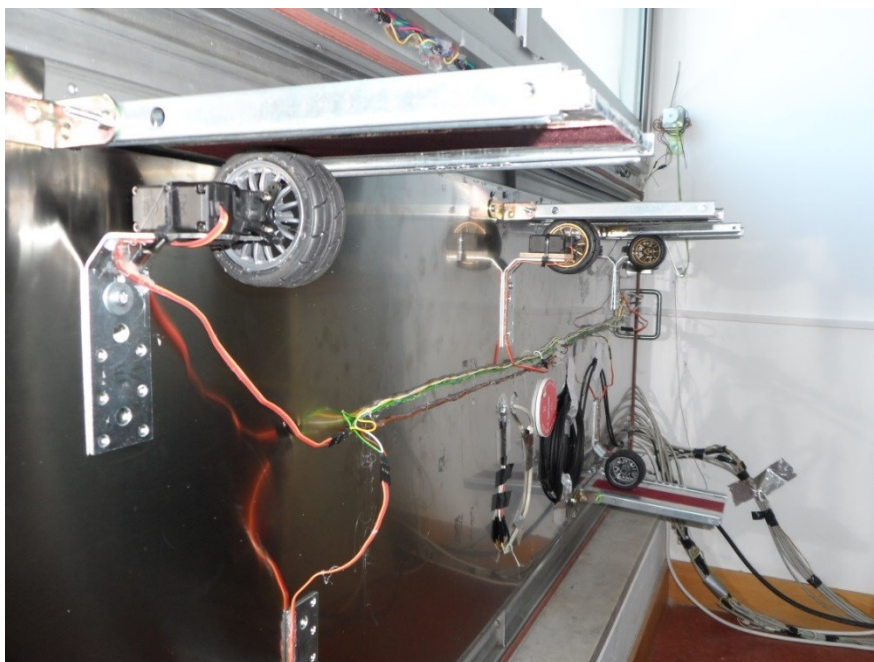


Figura 5.13 – Servomotores acoplados a rodas que abrem/fecham as gavetas da bateria térmica

### 5.3.1.3 Relé

Função: Foram utilizados em **d)** e **e)**, um relé (Figura 5.14) em cada circuito de ventiladores, com o objectivo de interromper ou não o circuito, consoante se queira os ventiladores ligados ou desligados.

Quantidade: 2

Características Técnicas	
Tensão de controlo	5 V
Corrente máxima do controlado AC (230V)	10 A
Corrente máxima do controlado DC (30V)	10 A

Quadro 5.4 – Características técnicas, Relé



Figura 5.14 – Relé

## 5.3.2 Outros componentes

### 5.3.2.1 Arduíno Mega 2560 R3

Função: O Arduíno (Figura 5.15) efectua o controlo de todo o sistema de automatização, fazendo a leitura dos sinais fornecidos pelos sensores de temperatura, comparando as mesmas segundo um código lógico, e por fim enviando sinais de controlo aos actuadores.

Quantidade: 1

Características Técnicas	
Microcontrolador	ATmega2560
Tensão de operação	5 V
Entradas/saídas digitais I/O	54
Entradas analógicas	16
Memória	256 kB

Quadro 5.5 – Características técnicas, Arduíno Mega 2560 R3



Figura 5.15 – Arduíno Mega 2560 R3

### 5.3.2.2 Big easy driver

Função: O big easy driver (Figura 5.16) é um controlador de motores passo-a-passo bipolares. A sua função é controlar os motores de passo-a-passo instalados neste sistema. Foram utilizados dois big easy driver, um para controlar os dois motores das comportas centrais, **a)**, e o outro para controlar o motor das comportas interiores, **b)**. Os motores associados às comportas centrais, estando ligados em paralelo ao mesmo controlador recebem o mesmo sinal.

Quantidade: 2

Características Técnicas	
Tipo de motor	Bipolar
Tensão máxima de alimentação do controlador	35 V
Corrente máxima por fase dos motores	2 A

Quadro 5.6 – Características técnicas, Big easy driver



Figura 5.16 – Big easy driver

### 5.3.2.3 Transformador AC/DC 5V 3A

Função: Alimentar os servomotores utilizados nas gavetas isoladoras da bateria, c).

Quantidade: 1

Características Técnicas	
Tensão de entrada AC	100 a 240 V
Tensão de saída DC	5 V
Corrente máxima	3 A

Quadro 5.7 – Características técnicas, Transformador AC/DC 5V 3A



Figura 5.17 – Transformador AC/DC 5V 3ª

#### 5.3.2.4 Transformador estabilizado AC/DC 12V 5A

Função: Alimentar os controladores big easy driver, para estes posteriormente alimentarem os motores de passo.

Quantidade: 1

Características Técnicas	
Tensão de entrada AC	100 a 230 V
Tensão de saída DC	12 V
Corrente máxima	5 A

Quadro 5.8 – Características técnicas, Transformador AC/DC 12V 5A



Figura 5.18 – Transformador AC/DC 12V 5A

#### 5.3.2.5 Breadboard

Função: A breadboard (Figura 5.19) de prototipagem é o componente onde são ligados os fios vindos de todos os outros componentes.

Quantidade: 1

Características Técnicas	
Pontos de ligação	830

Quadro 5.9 – Características técnicas, Breadboard

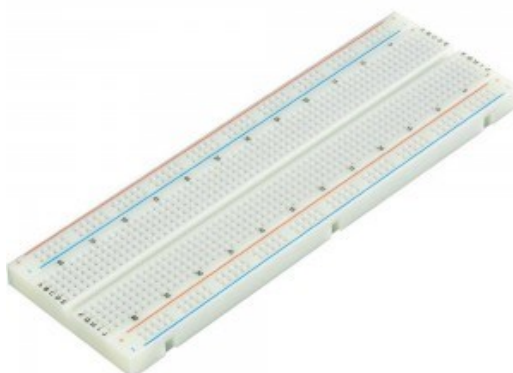


Figura 5.19 – Breadboard



### 5.3.2.6 Fusível

**Função:** O sistema mecânico associado às gavetas isoladoras da bateria, e consequentemente aos servomotores, necessita de um ajuste posicional preciso, e por vezes pode sair da posição correcta, impossibilitando que a gaveta abra ou feche. Uma característica dos servomotores é que após ser accionado o seu movimento, este apenas “descansa” quando estiver na posição solicitada, sendo que se algo o impedir e este ficar encravado a corrente consumida dispara para valores elevados. Desta forma o fusível protege os servomotores e todo o circuito associado caso isto aconteça.

**Quantidade:** 1

Características Técnicas	
Corrente de corte	2 A

Quadro 5.10 – Características técnicas, Fusível

### 5.3.2.7 Sensores de temperatura DS18B20

**Função:** Os sensores (Figura 5.20) serão utilizados para fazer a leitura das temperaturas em vários pontos de interesse do protótipo.

**Quantidade:** por definir

Características Técnicas	
Tipo de comunicação	One wire
Gama de temperaturas	-55 °C a +125 °C
Precisão (-10 °C a +85 °C)	+/- 0,5 °C
Resolução	9 a 10 bits

Quadro 5.11 – Características técnicas, Sensor de temperatura DS18B20

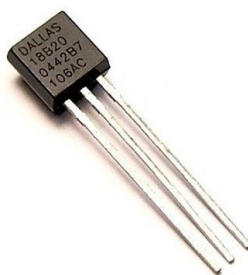


Figura 5.20 – Sensor DS18B20

### 5.3.2.8 Computador

**Função:** Fazer a comunicação entre o Arduino e o utilizador, por um lado para programar a activação dos modos de funcionamento a determinadas horas (INPUT de informação), e por outro para conhecer os valores das temperaturas lidas (OUTPUT de informação).

### 5.3.3 Montagem

A Figura 5.21 é uma fotografia da montagem dos componentes electrónicos que foram descritos anteriormente (exceptuando os motores) na qual está incluído o Arduino, que comanda todo o sistema de automatização.

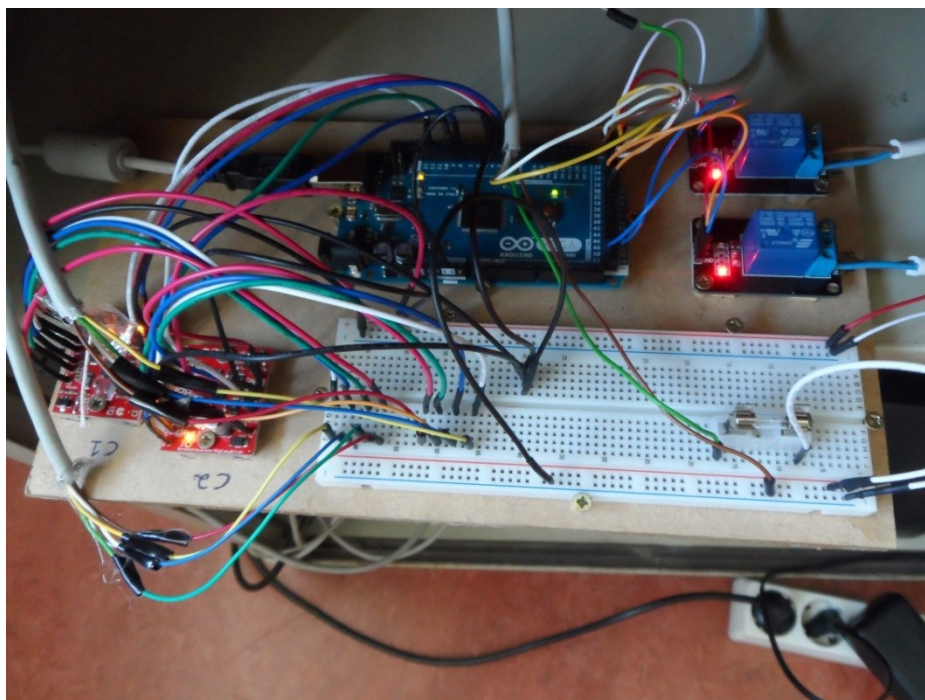
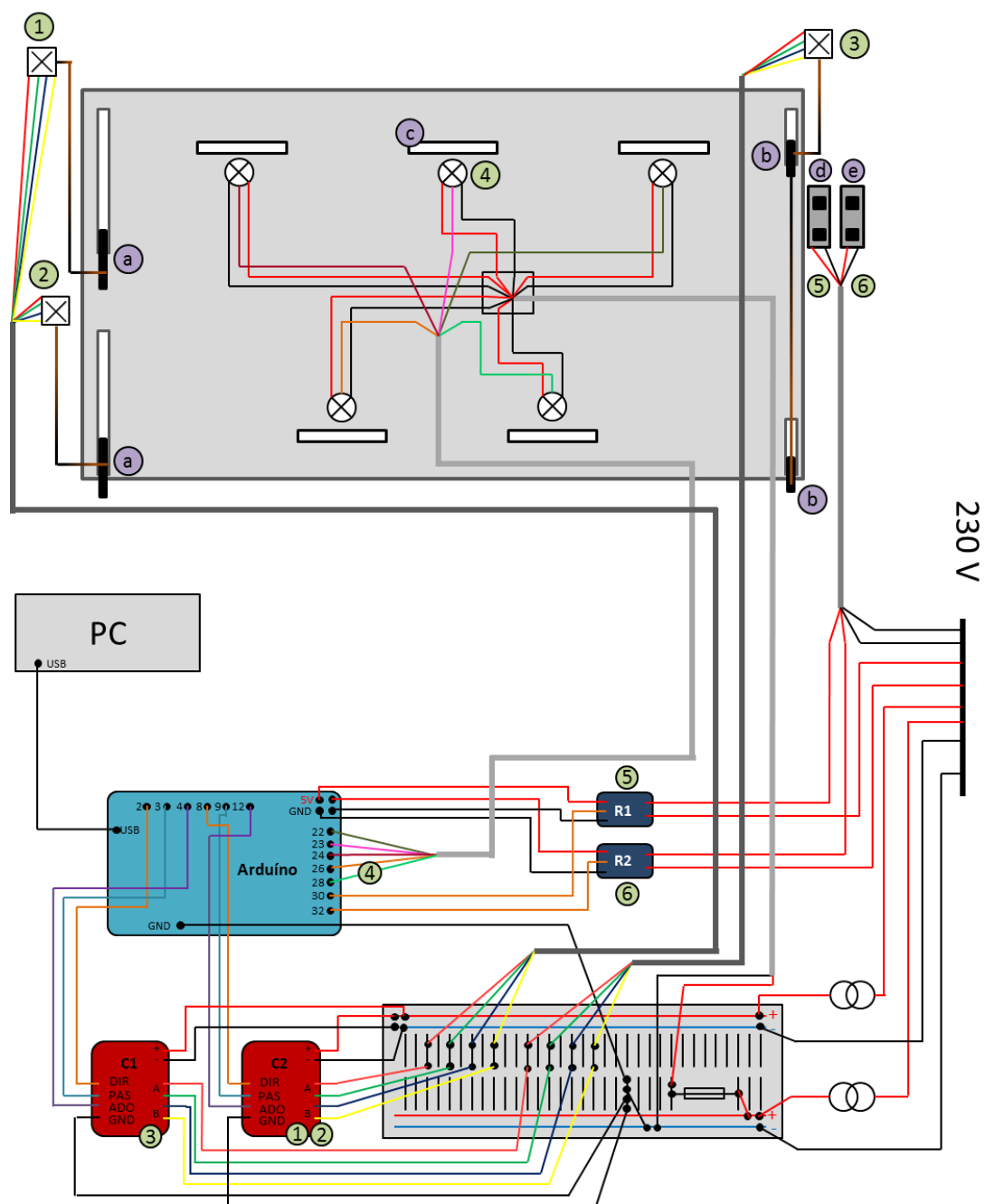


Figura 5.21 – Montagem dos componentes de automatização

O esquema eléctrico do sistema é representado na Figura 5.22, ilustrando todos os componentes utilizados, bem como a sua localização no protótipo, e ainda as ligações entre componentes.

O programa que comanda a automatização, e que foi feito na linguagem utilizada pelo Arduino, contém o código necessário para activar cada um dos actuadores. A actuação deste programa é activado digitando o número do modo de funcionamento que se pretende, ou agendando uma espécie de alarme para que a determinada hora um dos modos de funcionamento seja pôs-to em prática. O programa tem a informação do estado em que cada actuador deve estar consoante o modo de funcionamento requerido. O código de programação desenvolvido pode ser consultado no anexo I.



### Legenda:

- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| (a) Alavanca da Comporta central superior e inferior  | ● Ponto de ligação                    |
| (b) Alavanca da Comporta interior superior e inferior | — Cabo isolador                       |
| (c) Gavetas isoladoras da bateria                     | ⏏ Barramento                          |
| (d) Interruptor dos ventiladores da bateria           | — Componente de ligação mecânica      |
| (e) Interruptor dos ventiladores da cavidade de ar    | DIR Direcção de rotação do motor      |
| ⊗ Motor de passo                                      | PAS Passo do motor                    |
| ⊗ Servo-motor   | ADO Modo de adormecimento do motor    |
| ⊗ Transformador                                       | GND Ligação Terra (Ground) do Arduino |
| — Fusível   | C1 Controlador 1 de Motor de Passo    |
| □ Caixa de Junção                                     | C2 Controlador 2 de Motor de Passo    |
|   | R1 Relé 1                             |
|   | R2 Relé 2                             |

Figura 5.22 – Esquema eléctrico da automatização

## 6. Conclusões

### 6.1 Considerações finais

Sendo Portugal um dos países da Europa com maior exposição solar, e segundo a política recente da União Europeia que impõe a adopção do conceito de Net Zero Buildings, é evidente a importância do estudo e desenvolvimento de estruturas de aproveitamento solar aplicadas ao edifícios.

O conceito do sistema BIPV/T-PCM, em estudo nesta dissertação, é englobado nesta importante área de desenvolvimento e apresenta características que o indicam como um sistema atractivo à sua utilização. Por um lado é um sistema pouco invasivo do ponto de vista estético, uma vez que é incorporado nas paredes do edifício. Ainda que os módulos fotovoltaicos sejam expostos na fachada dos edifícios, essa incorporação é cada vez mais comum e aceite de forma agradável pela sociedade. Por outro lado é um sistema muito versátil, uma vez que: permite o aquecimento no inverno; o arrefecimento no verão; e é um sistema com aproveitamento térmico, bem como eléctrico, sendo ainda que ambos se favorecem mutuamente, uma vez que o calor extraído pela componente térmica beneficia a componente eléctrica, visto que os módulos fotovoltaicos têm uma eficiência superior a temperaturas inferiores.

O sistema BIPV/T-PCM em estudo foi proposto com três objectivos principais: aquecer no inverno; arrefecer no verão; e aumentar a eficiência do PV arrefecendo-o.

O conceito empregue neste protótipo mostrou algum potencial no que toca ao primeiro objectivo, **aquecer no inverno**, atingindo uma eficiência global de inverno de 25,4%.

No modo de funcionamento de aquecimento directo (Modo 2) obteve-se uma eficiência média global de 39,4%, sendo que a eficiência máxima atingiu os 45% no período de maior irradiância.

Quanto ao modo de aquecimento que diz respeito ao armazenamento de energia no PCM (Modo1), o sistema apenas alcançou uma eficiência média global de 22,9%. Este limitado valor de eficiência deve-se à recirculação de ar no processo de carregamento do PCM.

O conceito da bateria térmica, constituída por diversas placas de PCM de pequena espessura colocadas paralelamente, mostrou funcionar de forma eficiente. Nos modos de funcionamento de descarregamento, Modo 3 e 5, o ar saiu sempre da bateria à temperatura do PCM, ou seja, a permuta de calor foi máxima. No modo de carregamento do PCM, Modo 1, a permuta de energia rondou sempre os 60%.

O segundo objectivo, o **arrefecimento no verão**, verificou-se impossível de colocar em prática, devido à incapacidade da bateria térmica se manter suficientemente adiabática, ou seja, possuir uma capacidade de isolamento suficiente para evitar fluxo de calor do exterior para o interior da bateria térmica. No entanto, e como foi explicado, analisou-se a capacidade do sistema impedir a penetração de calor no interior do edifício, sendo que o sistema mostrou ser bastante eficaz, com uma eficiência média de isolamento de 96,6%.

No processo de comparação dos Modos de funcionamento 8 e 9, com ventilação do PV e sem ventilação do PV, respectivamente, que teve por objectivo entender a capacidade de **arrefecimento do PV**, verificou-se ser ineficiente a ventilação do PV no ensaio realizado. Electricamente a energia consumida pelos ventiladores não balanceia positivamente o aumento de eficiência na produção do PV, sendo que quando não existe ventilação a eficiência do PV é de 8%, subindo para 8,1% quando se realiza ventilação. De facto a temperatura do PV diminui com a ventilação, chegando a verificar-se

uma diminuição de 1,5 °C na temperatura do PV quando se efectua ventilação, no entanto, não é suficiente para aumentar significativamente a eficiência eléctrica do mesmo. Termicamente, a ventilação do PV no verão mostrou ter também impactos negativos, devido à incapacidade de isolamento da bateria térmica. Uma vez que a ventilação do PV promove o aumento da temperatura do ar na cavidade de ar, esse aumento de temperatura do ar promove também a transferência de calor para a bateria térmica, e da bateria para a sala, aumentando assim o fluxo de calor para a sala.

Na análise do período de inverno, os ventiladores mostraram consumir 72,9% da energia produzida pelo PV, que ainda assim é um valor significativo. Por outro lado, pode-se entender que não foi consumida energia a partir do exterior, ou seja, o sistema é auto-suficiente electricamente.

Segundo a análise de balanço energético térmico de aplicação do sistema a uma sala verificou-se que é possível perfazer as necessidades térmicas de aquecimento de uma sala com um sistema semelhante mas com o quadruplo da dimensão. Verificou-se que a aplicação de um sistema quatro vezes superior seria possível de instalar no caso exposto, bem como deixaria espaço suficiente para a colocação de uma janela.

Da quantidade de energia transferida para a sala sob a forma de calor no dia de inverno em análise, correspondente a 3805 kJ, apenas 611 kJ se deveram à utilização do PCM, ou seja, apenas 16% da energia total transferida para a sala proveio do carregamento e posterior descarregamento do PCM. A grande parte dessa energia proveio da utilização do modo de aquecimento directo da sala (Modo 2).

Ainda que com uma pequena contribuição no aquecimento da sala no período de inverno, o PCM é o que diferencia este sistema de um simples sistema de aquecimento directo, uma vez que este permite a versatilidade que o sistema possui. Durante o inverno permite que se armazene energia para posteriormente ser libertada para o interior da sala num período mais tardio e de maior necessidade energética (Modo 1 e 3). No verão permite que se arrefeça o PCM durante a noite para posteriormente transferir energia da sala para o PCM (Modo 5 e 6).

O conceito de bateria térmica de PCM mostrou funcionar, uma vez que é possível nela armazenar energia sob a forma de calor latente e sensível. No entanto, a sua capacidade de isolamento, que lhe concedia a sua característica principal (o facto de ser adiabática) não alcançou o efeito desejado, incapacitando assim o correcto funcionamento do sistema, em específico do Modo de funcionamento 6, que previa que no verão se descarrega-se o PCM para o exterior durante a noite, para durante o dia se transferir calor da sala para o PCM. Sem a capacidade da bateria térmica ser praticamente adiabática será impossível colocar esta ideologia em prática.

A capacidade aerodinâmica dos canais do sistema BIPV/T-PCM mostraram ser outra das grandes barreiras ao eficiente funcionamento do mesmo. Em quase todos os modos de funcionamento se verificaram recirculações de ar no interior do sistema devido às formas pouco aerodinâmicas do mesmo, que impedem um escoamento pouco perturbado. É esse um dos principais pontos a ser repensado neste sistema, uma vez que o ar é o fluido de transporte, e sem uma correcta transferência de calor entre os elementos do sistema é impossível atingir-se uma boa eficiência de operação do mesmo.

O ensaio realizado para testar o sistema no inverno, foi efectuado num período em que já não se verificavam as condições características dessa estação (5 de Maio). Assim sendo, é presumível que uma maior irradiância, factor que se verifica nos meses de inverno, implique uma maior quantidade de energia incidente no sistema, e como tal uma maior quantidade de calor transferido para o interior do edifício. Para além disso, a diferença de temperaturas entre o PV e o interior da sala será superior, o que implicará uma maior eficiência do sistema. Por outro lado a diferença de temperaturas entre o PV e o exterior também é superior, o que levará a uma maior quantidade de energia perdida para o exterior.

Verificou-se no decorrer do presente trabalho que sendo este sistema altamente versátil e dependente dos modos de funcionamento, é essencial que para uma boa gestão energética este seja automatizado e operado segundo um código otimizado de gestão energética. Esta automatização é uma vantagem para o sistema, pois permite uma comparação instantânea das temperaturas envolvidas, adoptando assim um comportamento mais eficiente. No decorrer da dissertação apenas se pensou na automatização como um mecanismo de abertura/fecho de comportas e ligar/desligar de ventiladores, no entanto esta pode-se tornar mais complexa e completa por exemplo controlando o caudal imposto pelos ventiladores. Com essa característica pode ter-se um controlo directo da quantidade de energia transferida através do escoamento, uma vez que se controla o caudal.

A complementaridade da componente térmica e eléctrica deste sistema híbrido BIPV/T-PCM pode ser projectada mais além do ponto de vista da gestão energética. Se através da tensão de funcionamento dos módulos desviarmos o ponto de máxima potência para um ponto de menor potência, essa energia que não é convertida em electricidade será convertida em calor, aumentando a percentagem de aproveitamento da componente térmica. Assim, através da tensão de funcionamento do módulo fotovoltaico conseguimos gerir a quantidade de energia que queremos sob a forma de electricidade ou sob a forma de calor, em função das necessidades do edifício. Actualmente a eficiência dos módulos fotovoltaicos é relativamente reduzida e portanto a energia convertida em electricidade também o é, tornando esta ideia pouco útil. No entanto, se supusermos que no futuro estes módulos atingiram eficiências mais altas, a energia convertida em electricidade será também superior, o que oferecerá uma maior margem para optar entre energia sob a forma de calor ou sob a forma de electricidade.

## 6.2 Trabalho futuro

O sistema mostrou possuir um grande potencial, embora existem alguns aspectos que precisam de ser alterados e desenvolvidos para que se possa tirar o máximo partido deste conceito promissor:

- A principal inaptidão do sistema deve-se à recirculação de ar imposta pela forma do protótipo em alguns modos de funcionamento, principalmente no modo de carregamento do PCM, que implica que o ar percorra um caminho que efectua um ângulo de 180°.

Numa primeira fase será necessário conhecer pormenorizadamente as zonas onde a recirculação é criada, alterando o sistema de forma a tornar-se mais aerodinâmico.

Uma solução possível para este problema, é utilizarem-se tubos entre zonas, com a incorporação do ventilador no interior do tubo. Assim, o tubo embora oferece-se mais perda de carga por atrito com a sua superfície aliviaria zonas de recirculação de ar, devido à sua capacidade de fazer curvas perfeitas.

Outra solução seria a colocação da bateria lado a lado com a cavidade de ar, fazendo com que o ar assim que passa pelo PV se dirija de imediato para a bateria de PCM sem qualquer curva ou canto para contornar. Só após passar pela bateria, e descarregar a energia no PCM, é que teria que ser sujeito a uma curva ou canto para regressar ao início da cavidade de ar. Este método implicaria a utilização do dobro do comprimento da parede.

- O ideal proposto para o período de verão, que consistia em descarregar o PCM para o exterior e posteriormente carregá-lo com a energia da sala, mostrou ser impossível de realizar por a bateria não se manter adiabática, penetrando calor para o seu interior.

Assim, para ser possível a colocação desse ideal em prática, é imprescindível que a bateria seja praticamente adiabática. A forma mais óbvia de o fazer é aumentando a espessura do isolamento. Por outro lado, pode colocar-se a bateria separada do resto do sistema, evitando assim o contacto directo entre esta e a fonte de calor, a cavidade de ar.

- O modo de funcionamento de arrefecimento do PCM durante a noite, Modo 5, demonstrou a existência de acumulação de ar na cavidade de ar, em vez de expelir o ar quente para o exterior. Este fenómeno pode ser facilmente corrigido com a colocação de uma comporta ou gaveta na parte superior e inferior da cavidade de ar, impedindo que o ar se desloque para lá.

O sistema apresentou alguns aspectos que inibiram a sua capacidade de atingir a máxima eficiência. No entanto, existiram também algumas realidades que mostraram funcionar bem, mas que podem ser melhoradas:

- Para aumentar a capacidade de transferência de calor entre o PV e a cavidade de ar podem colocar-se alhetas no PV aumentando assim a sua área de transferência de calor, e posteriormente a taxa de transferência de calor. Futuramente pensou-se utilizar o método mostrado no artigo desenvolvido por Canhoto et al [22], fixando o objectivo de maximizar a energia transferida.
- O mesmo método pode ser utilizado para estudar ao pormenor o processo de transferência de calor na bateria térmica, de forma a poder aumentar o caudal, aumentando o calor extraído, mas mantendo a eficiência elevada.
- A nível da gestão energética do sistema, futuramente será necessário estudar a fundo cada um dos modos de funcionamento, de modo a conhecer a eficiência dos mesmos em circunstâncias variadas.

Embora se tenha proposto um código de gestão energética, como trabalho futuro será sempre possível desenvolver um código mais eficiente e que tenha até uma capacidade de memória, aprendendo com os erros que ele próprio executou.

# Bibliografia

- [1] Quesada G, Rousse D, Dutil Y, Badache M, Hallé S. A comprehensive review of solar facades. Opaque solar facades. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:2820–32.
- [2] European C. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings 2010.
- [3] Quesada G, Rousse D, Dutil Y, Badache M, Hallé S. A comprehensive review of solar facades. Transparent and translucent solar facades. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:2643–51.
- [4] Hernández A, Lesino G, Rodriguez L, Linares J. Design, Modelling and computational assessment of passive and active solar collectors for thermal conditioning of the first bioclimatic hospital in Argentina. *J Build Performacem Simulating* 2009.
- [5] Candanedo LM, Athienitis AK, Candanedo J, O'Brien W, Chen YX. A Simplified Model For Open Loop Air\_Based BIPVT/T Systems 2009:1–12.
- [6] Yang H, Burnette J, Ji J. Simple Approach to cooling load component calculation through PV walls. *Energy Build* 2000;31:285–90.
- [7] Mathew X, Petter Jelle B, Breivik C, Drolsum Røkenes H. Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2012;100:69–96.
- [8] Edward M. The Passive Solar Energy Book. Rodale Press; 1979.
- [9] Anthony D. The Solar House: Pioneering Sustainable Design. Rizzoli; 2013.
- [10] Jaber S, Ajib S. Optimum design of Trombe wall system in mediterranean region. *Sol Energy* 2011;85:1891–8.
- [11] Pless S, Nrel PT. Trombe Walls in Low-Energy Buildings : Practical Experiences 2004.
- [12] Athientis AK, Liu C, Hawes D, Banu D, Feldman D. Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage. *Build Environ* 1997;32:405–10.
- [13] Athienitis AK, Zhang J. A Study of Double Facades with Phase-Change Storage and Photovoltaics. *Int. Conf. "Passive Low Cool. Built Environ., Department of Buildind, Civil and Environmental Engineering of Concordia University: 2005, p. 855–9.*
- [14] Aelenei L, Pereira R, Gonçalves H, Athienitis A. Thermal performance of a hybrid BIPV-PCM : Modeling , Design and Experimental investigation. *SHC 2013, Int. Conf. Sol. Heat. Cool. Build. Ind., vol. 00, Freiburg: Elsevier; 2013.*
- [15] Baetens R, Jelle BP, Gustavsen A. Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy Build* 2010;42:1361–8.
- [16] Álvarez S, Cabeza LF, Ruiz-Pardo A, Castell A, Tenorio JA. Building integration of PCM for natural cooling of buildings. *Appl Energy* 2013;109:514–22.



- [17] Tabares-Velasco PC, Christensen C, Bianchi M. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. *Build Environ* 2012;54:186–96.
- [18] Pro G. Energia Fotovoltaica, manual sobre tecnologias, projecto e instalação 2004.
- [19] Bejan A. Transferência de Calor. Editora Edgard Blucher Ltda; 1996.
- [20] Conte SD, Boor C de. Elementary Numerical Analysis - An Algorithmic Approach. 1981.
- [21] Instituto Nacional de Estatística , DGEG. Inquérito ao consumo de energia no sector doméstico 2010, 2011.
- [22] Canhoto P, Reis a. H. Optimization of fluid flow and internal geometric structure of volumes cooled by forced convection in an array of parallel tubes. *Int J Heat Mass Transf* 2011;54:4288–99.

## **Anexo I**

### **Programa de control de los actuadores**

```

#include <Servo.h>
#include <Time.h>

//informação:Ao fazer o upload do programa os motores de passo devem estar
na posição superior, ou seja, com a fita enrolada

//leitura do teclado
int comando;
int modo;
int modo1;
int modo2;
int modo3;
int modo4;
int modo5;
int modo6;
int modo7;
int modo8;
int modo9;
int alarme;
//variáveis de hora
int hora = 25;
int hora1 = 25;
int hora2 = 25;
int hora3 = 25;
int hora4 = 25;
int hora5 = 25;
int hora6 = 25;
int hora7 = 25;
int hora8 = 25;
int hora9 = 25;
int minuto;
int minuto1;
int minuto2;
int minuto3;
int minuto4;
int minuto5;
int minuto6;
int minuto7;
int minuto8;
int minuto9;

//Variáveis Controlador 1
int DIRC1 = 2;           //pino da direcção
int STEPC1 = 3;          //pino dos passos
int SLEEPC1 = 4;         //Pino de ligar/desligar alimentação
int iC1 = 0;             //Contador de passos iniciado em zero
int estadoC1;            //Declaração da variável estado, para saber se está
aberto ou fechado

//Variáveis Controlador 2
int DIRC2 = 8;
int STEPC2 = 9;
int SLEEPC2 = 12;
int iC2 = 0;
int estadoC2;

//Variáveis servos
Servo servos1;
int posS1 = 180;

```

```

int estadoS1;          //variável de estado requerido
int estadoRS1;         //variável de estado real

//Variáveis servo2
Servo servo2;
int posS2 = 180;
int estadoS2;
int estadoRS2;

//Variáveis servo3 (invertido)
Servo servo3;
int posS3 = 35;
int estadoS3;
int estadoRS3;

//Variáveis servo4
Servo servo4;
int posS4 = 180;
int estadoS4;
int estadoRS4;

//Variáveis servo5 (invertido)
Servo servo5;
int posS5 = 35;
int estadoS5;
int estadoRS5;

//Variáveis Relé1
int estadoR1;

//Variáveis Relé2
int estadoR2;

void setup() {
    Serial.begin(9600);          //Definição da velocidade de interação com o
    computador
    setTime(16,39,0,30,6,14); // set time

    //Controlador 1
    pinMode(DIRC1,OUTPUT);
    pinMode(STEPC1,OUTPUT);      //Define os pinos do controlador como saídas
    pinMode(SLEEPC1,OUTPUT);
    digitalWrite(DIRC1,LOW);     //Define o lado de rotação inicial
    digitalWrite(SLEEPC1,LOW);   //Define o estado inicial da alimentação
    como desligado
    estadoC1 = 0;                //Aberto=1 Fechado=0

    //Controlador 2
    pinMode(DIRC2,OUTPUT);
    pinMode(STEPC2,OUTPUT);
    pinMode(SLEEPC2,OUTPUT);
    digitalWrite(DIRC2,LOW);
    digitalWrite(SLEEPC2,LOW);
    estadoC2 = 1;

    //Servo1
    servo1.attach(22);
    servo1.write(40);
    estadoRS1 = 0;
    estadoS1 = 0;

```

```

//Servo2
servo2.attach(23);
servo2.write(53);
estadoRS2 = 0;
estadoS2 = 0;

//Servo3
servo3.attach(24);
servo3.write(180);
estadoRS3 = 1;
estadoS3 = 1;

//Servo4
servo4.attach(26);
servo4.write(35);
estadoRS4 = 0;
estadoS4 = 0;

//Servo5
servo5.attach(28);
servo5.write(180);
estadoRS5 = 1;
estadoS5 = 1;

//Relé1
pinMode(30,OUTPUT);
estadoR1 = 0;
digitalWrite(30,HIGH);

//Relé2
pinMode(32,OUTPUT);
estadoR2 = 0;
digitalWrite(32,HIGH);

Serial.println("Ja esta a bombar");

}

void loop() {

if (Serial.available() > 0 || hora1 != 25 || hora2 != 25 || hora3 != 25 ||
hora4 != 25 || hora5 != 25 || hora6 != 25 || hora7 != 25 || hora8 != 25 ||
hora9 != 25) { //Verifica se alguma tecla foi digitada
    comando = Serial.read(); //Iguala a variável comando ao que foi
digitado no teclado
    //Serial.println(comando); //Mostra ao utilizador o que foi digitado

    if( hour()==hora1 && minute()==minuto1){
        comando=modo1;
        hora1=25;
    }
    else if( hour()==hora2 && minute()==minuto2){
        comando=modo2;
        hora2=25;
    }
    else if( hour()==hora3 && minute()==minuto3){
        comando=modo3;
        hora3=25;
    }
}
}

```

```

}
else if( hour()==hora4 && minute()==minuto4){
    comando=modo4;
    hora4=25;
}
else if( hour()==hora5 && minute()==minuto5){
    comando=modo5;
    hora5=25;
}
else if( hour()==hora6 && minute()==minuto6){
    comando=modo6;
    hora6=25;
}
else if( hour()==hora7 && minute()==minuto7){
    comando=modo7;
    hora7=25;
}
else if( hour()==hora8 && minute()==minuto8){
    comando=modo8;
    hora8=25;
}
else if( hour()==hora9 && minute()==minuto9){
    comando=modo9;
    hora9=25;
}

if (comando==48) {

    Serial.println("Qual dos alarmes quer activar?");
    alarma=-1;
    while(alarma== -1){
        alarma = Serial.read();
    }
    if(alarma==49){
        alarma=1;
    }
    else if(alarma==50){
        alarma=2;
    }
    else if(alarma==51){
        alarma=3;
    }
    else if(alarma==52){
        alarma=4;
    }
    else if(alarma==53){
        alarma=5;
    }
    else if(alarma==54){
        alarma=6;
    }
    else if(alarma==55){
        alarma=7;
    }
    else if(alarma==56){
        alarma=8;
    }
    else if(alarma==57){
        alarma=9;
    }
}

```

```

Serial.println("Digite o modo que pretende");
modo=-1;
while(modo===-1){
modo = Serial.read();
//Serial.println(modo);
}
Serial.println("Digite a hora");
hora=-1;
while(hora===-1){
hora = Serial.read();
    if(hora==65){
        hora=1;
    }
    else if(hora==66){
        hora=2;
    }
    else if(hora==67){
        hora=3;
    }
    else if(hora==68){
        hora=4;
    }
    else if(hora==69){
        hora=5;
    }
    else if(hora==70){
        hora=6;
    }
    else if(hora==71){
        hora=7;
    }
    else if(hora==72){
        hora=8;
    }
    else if(hora==73){
        hora=9;
    }
    else if(hora==74){
        hora=10;
    }
    else if(hora==75){
        hora=11;
    }
    else if(hora==76){
        hora=12;
    }
    else if(hora==77){
        hora=13;
    }
    else if(hora==78){
        hora=14;
    }
    else if(hora==79){
        hora=15;
    }
    else if(hora==80){
        hora=16;
    }
    else if(hora==81){
        hora=17;
    }
}

```

```

    }
    else if(hora==82){
        hora=18;
    }
    else if(hora==83){
        hora=19;
    }
    else if(hora==84){
        hora=20;
    }
    else if(hora==85){
        hora=21;
    }
    else if(hora==86){
        hora=22;
    }
    else if(hora==87){
        hora=23;
    }
    else if(hora==88){
        hora=0;
    }
    //Serial.println(hora);
}
Serial.println("Digite o minuto");
minuto=-1;
while(minuto===-1){
    minuto = Serial.read();
    if(minuto==48){
        minuto=0;
    }
    else if(minuto==49){
        minuto=10;
    }
    else if(minuto==50){
        minuto=20;
    }
    else if(minuto==51){
        minuto=30;
    }
    else if(minuto==52){
        minuto=40;
    }
    else if(minuto==53){
        minuto=50;
    }
    //Serial.println(minuto);
}

if(alarme==1){
    horal=hora;
    minutol=minuto;
    modol=modo;
}
else if(alarme==2){
    hora2=hora;
    minuto2=minuto;
    modo2=modo;
}
else if(alarme==3){
    hora3=hora;

```



```

        minuto3=minuto;
        modo3=modo;
    }
    else if(alarme==4){
        hora4=hora;
        minuto4=minuto;
        modo4=modo;
    }
    else if(alarme==5){
        hora5=hora;
        minuto5=minuto;
        modo5=modo;
    }
    else if(alarme==6){
        hora6=hora;
        minuto6=minuto;
        modo6=modo;
    }
    else if(alarme==7){
        hora7=hora;
        minuto7=minuto;
        modo7=modo;
    }
    else if(alarme==8){
        hora8=hora;
        minuto8=minuto;
        modo8=modo;
    }
    else if(alarme==9){
        hora9=hora;
        minuto9=minuto;
        modo9=modo;
    }
}

Serial.print("Esta agendado o alarme ");
Serial.print(alarme);
Serial.print(" com o modo ");
Serial.print(modo);
Serial.print(" a hora ");
Serial.print(hora);
Serial.print(":");
Serial.println(minuto);

}
else if(comando==97) {
    Serial.println("Qual dos alarmes quer desactivar?");
    alarme=-1;
    while(alarme==-1){
        alarme = Serial.read();
    }
    if(alarme==49){
        hora1=25;
        Serial.println("O alarme 1 foi desactivado");
    }
    else if(alarme==50){
        hora2=25;
        Serial.println("O alarme 2 foi desactivado");
    }
    else if(alarme==51){
        hora3=25;
    }
}

```

```

        Serial.println("O alarme 3 foi desativado");
    }
    else if(alarme==52){
        hora4=25;
        Serial.println("O alarme 4 foi desativado");
    }
    else if(alarme==53){
        hora5=25;
        Serial.println("O alarme 5 foi desativado");
    }
    else if(alarme==54){
        hora6=25;
        Serial.println("O alarme 6 foi desativado");
    }
    else if(alarme==55){
        hora7=25;
        Serial.println("O alarme 7 foi desativado");
    }
    else if(alarme==56){
        hora8=25;
        Serial.println("O alarme 8 foi desativado");
    }
    else if(alarme==57){
        hora9=25;
        Serial.println("O alarme 9 foi desativado");
    }
}
else if(comando==98){
    if(hora1 != 25){
        Serial.print("Esta agendado o alarme 1 com o modo ");
        Serial.print(modos1);
        Serial.print(" a hora ");
        Serial.print(hora1);
        Serial.print(":");
        Serial.println(minuto1);
    }
    if(hora2 != 25){
        Serial.print("Esta agendado o alarme 2 com o modo ");
        Serial.print(modos2);
        Serial.print(" a hora ");
        Serial.print(hora2);
        Serial.print(":");
        Serial.println(minuto2);
    }
    if(hora3 != 25){
        Serial.print("Esta agendado o alarme 3 com o modo ");
        Serial.print(modos3);
        Serial.print("a hora ");
        Serial.print(hora3);
        Serial.print(":");
        Serial.println(minuto3);
    }
    if(hora4 != 25){
        Serial.print("Esta agendado o alarme 4 com o modo ");
        Serial.print(modos4);
        Serial.print("a hora ");
        Serial.print(hora4);
        Serial.print(":");
        Serial.println(minuto4);
    }
}

```

```

}
if(hora5 != 25){
    Serial.print("Esta agendado o alarme 5 com o modo ");
    Serial.print(modos5);
    Serial.print("a hora ");
    Serial.print(hora5);
    Serial.print(":");
    Serial.println(minuto5);
}
if(hora6 != 25){
    Serial.print("Esta agendado o alarme 6 com o modo ");
    Serial.print(modos6);
    Serial.print("a hora ");
    Serial.print(hora6);
    Serial.print(":");
    Serial.println(minuto6);
}
if(hora7 != 25){
    Serial.print("Esta agendado o alarme 7 com o modo ");
    Serial.print(modos7);
    Serial.print("a hora ");
    Serial.print(hora7);
    Serial.print(":");
    Serial.println(minuto7);
}
if(hora8 != 25){
    Serial.print("Esta agendado o alarme 8 com o modo ");
    Serial.print(modos8);
    Serial.print("a hora ");
    Serial.print(hora8);
    Serial.print(":");
    Serial.println(minuto8);
}
if(hora9 != 25){
    Serial.print("Esta agendado o alarme 9 com o modo ");
    Serial.print(modos9);
    Serial.print("a hora ");
    Serial.print(hora9);
    Serial.print(":");
    Serial.println(minuto9);
}
}
else if(comando==99){
    digitalClockDisplay();
}

//Declaração de Modos
else if(comando==49) {    //Modo 1
    estadoC1=1;
    estadoC2=0;
    estadoS1=1;
    estadoS2=1;
    estadoS3=0;
    estadoS4=1;
    estadoS5=0;
    estadoR1=1;
    estadoR2=0;
    Serial.println("Modo 1:");
    digitalClockDisplay();
}

```

```

    }
    else if(comando==50) {    //Modo 2
        estadoC1=1;
        estadoC2=1;
        estadoS1=0;
        estadoS2=0;
        estadoS3=1;
        estadoS4=0;
        estadoS5=1;
        estadoR1=0;
        estadoR2=1;
        Serial.println("Modo 2:");
        digitalClockDisplay();
    }
    else if(comando==51) {    //Modo 3
        estadoC1=0;
        estadoC2=1;
        estadoS1=1;
        estadoS2=1;
        estadoS3=0;
        estadoS4=1;
        estadoS5=0;
        estadoR1=1;
        estadoR2=0;
        Serial.println("Modo 3:");
        digitalClockDisplay();
    }
    else if(comando==52) {    //Modo 4
        estadoC1=1;
        estadoC2=1;
        estadoS1=1;
        estadoS2=1;
        estadoS3=0;
        estadoS4=1;
        estadoS5=0;
        estadoR1=1;
        estadoR2=1;
        Serial.println("Modo 4:");
        digitalClockDisplay();
    }
    else if(comando==53) {    //Modo 5
        estadoC1=1;
        estadoC2=0;
        estadoS1=1;
        estadoS2=1;
        estadoS3=0;
        estadoS4=1;
        estadoS5=0;
        estadoR1=1;
        estadoR2=0;
        Serial.println("Modo 5:");
        digitalClockDisplay();
    }
    else if(comando==54) {    //Modo 6
        estadoC1=0;
        estadoC2=1;
        estadoS1=1;
        estadoS2=1;
        estadoS3=0;
        estadoS4=1;
        estadoS5=0;
    }

```

```

    estadoR1=1;
    estadoR2=1;
    Serial.println("Modo 6:");
    digitalClockDisplay();
}
else if(comando==55) {    //Modo 7
    estadoC1=0;
    estadoC2=0;
    estadoS1=0;
    estadoS2=0;
    estadoS3=1;
    estadoS4=0;
    estadoS5=1;
    estadoR1=0;
    estadoR2=0;
    Serial.println("Modo 7:");
    digitalClockDisplay();
}
else if(comando==56) {    //Modo 8
    estadoC1=0;
    estadoC2=0;
    estadoS1=0;
    estadoS2=0;
    estadoS3=1;
    estadoS4=0;
    estadoS5=1;
    estadoR1=0;
    estadoR2=1;
    Serial.println("Modo 8:");
    digitalClockDisplay();
}
else if(comando==57) {    //Modo MANUENTEÇÃO
    estadoC1=0;
    estadoC2=1;
    estadoS1=0;
    estadoS2=0;
    estadoS3=1;
    estadoS4=0;
    estadoS5=1;
    estadoR1=0;
    estadoR2=0;
    Serial.println("Modo Manutencao:");
    digitalClockDisplay();
}

//Declaração de Actividade

//Desligar Relé 1
if(estadoR1 == 0) {
    digitalWrite(30,HIGH);
}

//Desligar Relé 2
if(estadoR2 == 0) {
    digitalWrite(32,HIGH);
}

```

```

//Controlo do C1
//abertura da gaveta C1

if(estadoC1 == 1) {
    digitalWrite(SLEEP1,HIGH);
    digitalWrite(DIR1,HIGH);

    while(iC1<(32500)) {
        digitalWrite(STEP1,HIGH);
        digitalWrite(STEP1,LOW);
        delayMicroseconds(500);

        iC1++;
    }
    digitalWrite(SLEEP1,LOW);
}

//fecho da gaveta C1
else if(estadoC1 == 0) {
    digitalWrite(SLEEP1,HIGH);
    digitalWrite(DIR1,LOW);

    while(iC1>(0)) {
        digitalWrite(STEP1,HIGH);
        digitalWrite(STEP1,LOW);
        delayMicroseconds(500);

        iC1--;
    }
    digitalWrite(SLEEP1,LOW);
}

//Controlo do C2
//abertura da gaveta C2
if(estadoC2 == 0) {
    digitalWrite(SLEEP2,HIGH);
    digitalWrite(DIR2,LOW);

    while(iC2<(14200)) {
        digitalWrite(STEP2,HIGH);
        digitalWrite(STEP2,LOW);
        delayMicroseconds(500);

        iC2++;
    }
    digitalWrite(SLEEP2,LOW);
}

//fecho da gaveta C2
else if(estadoC2 == 1) {
    digitalWrite(SLEEP2,HIGH);
    digitalWrite(DIR2,HIGH);

    while(iC2>(0)) {
        digitalWrite(STEP2,HIGH);
        digitalWrite(STEP2,LOW);
        delayMicroseconds(500);
    }
}

```

```

        iC2--;
    }
    digitalWrite(SLEEP2,LOW);
}

//Servo 1
//Abertura da comporta S1
if(estadoS1 == 0 && estadoRS1 != 0) {
    for(posS1 = 180; posS1 >= 40; posS1 -=1)
    {
        servo1.write(posS1);
        delay(15);
    }
    estadoRS1 = 0;
}

//Fecho da comporta S1
else if(estadoS1 == 1 && estadoRS1 != 1) {
    for(posS1 = 40; posS1 < 180; posS1 +=1)
    {
        servo1.write(posS1);
        delay(15);
    }
    estadoRS1 = 1;
}

//Servo 2
//Abertura da comporta S2
if(estadoS2 == 0 && estadoRS2 != 0) {
    for(posS2 = 180; posS2 >= 53; posS2 -=1)
    {
        servo2.write(posS2);
        delay(15);
    }
    estadoRS2 = 0;
}

//Fecho da comporta S2
else if(estadoS2 == 1 && estadoRS2 != 1) {
    for(posS2 = 53; posS2 <= 180; posS2 +=1)
    {
        servo2.write(posS2);
        delay(15);
    }
    estadoRS2 = 1;
}

//Servo 3
//Abertura da comporta S3
if(estadoS3 == 0 && estadoRS3 != 0) {
    for(posS3 = 180; posS3 >= 35; posS3 -=1)
    {
        servo3.write(posS3);
        delay(15);
    }
    estadoRS3 = 0;
}

```

```

//Fecho da comporta S3
else if(estadoS3 == 1 && estadoRS3 != 1) {
    for(posS3 = 35; posS3 <= 180; posS3 +=1)
    {
        servo3.write(posS3);
        delay(15);
    }
    estadoRS3 = 1;
}

//Servo 4
//Abertura da comporta S4
if(estadoS4 == 0 && estadoRS4 != 0) {
    for(posS4 = 180; posS4 >= 35; posS4 -=1)
    {
        servo4.write(posS4);
        delay(15);
    }
    estadoRS4 = 0;
}

//Fecho da comporta S4
else if(estadoS4 == 1 && estadoRS4 != 1) {
    for(posS4 = 35; posS4 <= 180; posS4 +=1)
    {
        servo4.write(posS4);
        delay(15);
    }
    estadoRS4 = 1;
}

//Servo 5
//Abertura da comporta S5
if(estadoS5 == 0 && estadoRS5 != 0) {
    for(posS5 = 180; posS5 >= 55; posS5 -=1)
    {
        servo5.write(posS5);
        delay(15);
    }
    estadoRS5 = 0;
}

//Fecho da comporta S5
else if(estadoS5 == 1 && estadoRS5 != 1) {
    for(posS5 = 55; posS5 <= 180; posS5 +=1)
    {
        servo5.write(posS5);
        delay(15);
    }
    estadoRS5 = 1;
}

//Relé 1
//Ligar Relé 1
if(estadoR1 == 1) {
    digitalWrite(30,LOW);
}

```



```

//Relé 2
//Ligar Relé 2
if(estadoR2 == 1) {
    digitalWrite(32,LOW);

}

}

}

// Funções do Tempo
void digitalClockDisplay(){
    // digital clock display of the time
    Serial.print(hour());
    printDigits(minute());
    printDigits(second());
    Serial.print(" ");
    Serial.print(day());
    Serial.print(" ");
    Serial.print(month());
    Serial.print(" ");
    Serial.print(year());
    Serial.println();
}

void printDigits(int digits){
    // utility function for clock display: prints preceding colon and leading
    0
    Serial.print(":");
    if(digits < 10)
        Serial.print('0');
    Serial.print(digits);
}

```

## **Anexo II**

### **Informação Técnica**



The miracles of science™

## DUPONT™ ENERGAIN®

Energy-saving thermal mass systems

### THERMAL MASS PANEL

Descriptive properties	Unit	Value
Thickness	mm	5.2
Width	mm	1000
Length	mm	1198
Area weight	kg/m²	4.5
Aluminium thickness (sheet)	µm	100
Aluminium thickness (edges)	µm	75
Thermal properties	Test Method	
Paraffin loading	Comparative test by DSC	% 60
Melt point (paraffin)	DSC method (1 °C/min)	°C 21.7
Latent heat storage capacity (0°C - 30°C)	DSC method (1 °C/min)	kJ/kg > 70
Total heat storage capacity (Temperature range 0°C to 30°C)	DSC method (1 °C/min)	kJ/kg ~ 140
Physical properties		
Aluminium sheet delamination force	Internal DuPont test method	N/cm > 20
Conductivity solid	BS EN 12667-2001	W/(m.K) 0.18
Conductivity liquid	BS EN 12667-2001	W/(m.K) 0.14
Flash Point (paraffin)	ASTM D56	°C 148

### PRODUCT DESCRIPTION

The panel is a fine mixture of ethylene based polymer (40%) designed by DuPont and paraffin wax (60%) laminated on both sides with a 100 µm aluminium sheet. The edges are closed with a 75 µm aluminium tape.

### REACTION TO FIRE

Single-flame source test	EN 11925-2	Class E
Surface spread of flame test	BS476-7	Class 1

### DURABILITY

Predicted to be durable for the life-time of a building  
Chemically inert with most materials

### ALUMINIUM TAPE

Descriptive Properties	Unit	Value
Thickness	µm	75
Width	mm	50

### DuPont patented technology

All values correspond to average results obtained in our laboratories and outside institutes and are indicative.  
The right is reserved to make changes at any time without notice.

Recommendations as to methods, use of materials and construction details are based on the experience and current knowledge of DuPont and are given in good faith as a general guide to designers, contractors and manufacturers. This information is not intended to substitute for any testings you may need to conduct to determine for yourself the suitability of our products for your particular purposes. This information may be subject to revision as new knowledge and experience becomes available since we cannot anticipate all variations in actual end-use conditions. DuPont makes no warranties and assumes no liability in connection with any use of this information. Nothing in this publication is to be considered as a licence to operate under a recommendation to infringe any patent right.



DuPont de Nemours (Luxembourg) S.à r.l.  
Rue Général Patton  
L-2984 Luxembourg  
Tel: 00352 3666 5885  
Fax: 00352 3666 5021  
E-mail: energain@lux.dupont.com  
[www.energain.dupont.com](http://www.energain.dupont.com)

Copyright © 2011 DuPont. All rights reserved. The DuPont Oval Logo, DuPont®, The miracles of science™ and Energain® are registered trademarks or trademarks of E.I. du Pont de Nemours and Company or its affiliates.

12/2011

Figura II.0.1 – Informação técnica do PCM

# Enecsys Micro Inverters SMI-240W-60-UL

intelligent reliable power



Technical Specification SMI-240W-60-UL	
Input Data (DC)	
Nominal Input Power	240W
Recommended Input Power (STC)	260W
Maximum DC Voltage	44V
Minimum DC Voltage	20V
MPPT Voltage Range	23V - 35V
Min/Max Start-up Voltage	22V / 42.5V
Maximum Input Current	12A
Maximum Input Short-circuit Current	16A
Output Data (AC)	
Maximum AC Output Power	225W
Nominal AC Output Current	0.94A
Nominal Output Voltage	240V
Nominal Frequency	60Hz <sup>*1</sup>
Power Factor	> 0.95
Total Harmonic Distortion	< 5%
Maximum Recommended Units per 20A Branch Circuit	17 (single phase)
Maximum Recommended Units per 15A Branch Circuit	12 (single phase)
Maximum Fault Current	8.5A AC 3ms
Efficiency	
CEC Efficiency	93.5%
Peak Efficiency	95.0%
Maximum Night Power Consumption	< 30mW
Mechanical Data	
Ambient Temperature Range	-40°C to 85°C
Enclosure Rating	UL 50 NEMA Type 4X
Dimensions (LxHxW)	262mm x 160mm x 35mm <sup>*2</sup>
Weight	1.8kg
Cooling	Natural Convection
Features & Compliance	
Safety Class Compliance	UL1741, CSA-C22.2.107.1-01
EMC (Emission & Immunity) Compliance	FCC Part 15 Class B
Grid Connection Compliance	IEEE 1547.1 <sup>*3</sup>
Communication	ZigBee IEEE 802.15.4
Connector	MC4 Compatible
PV Compatibility	Compatible with most 60 cell modules
Warranty	20 Years (at full ambient temperature range)

\*1 - Extended frequency range available to serve Hawaii market

\*2 - Without the mounting bracket

\*3 - In accordance with the Enecsys installation guidelines (please refer to the Enecsys Installation Manual)

All technical specifications contained within this document are subject to change without prior notice.

[www.enecsys.com](http://www.enecsys.com)



Figura II.0.2 – Informação técnica do inversor

# WARNING

HAZARDOUS ELECTRICITY CAN  
SHOCK, BURN OR CAUSE DEATH.  
DO NOT TOUCH TERMINALS.

<b>PHOTOVOLTAIC MODULE</b>				 
MODEL	KD145GH-4YU			
SER NO.	139A7B3R0000236			
IRRADIANCE AND CELL TEMPERATURE	1000Wm <sup>-2</sup> AM 1.5 25° C	800Wm <sup>-2</sup> AM 1.5 45° C	Pmax TOLERANCE +5%/-5%	
Pmax	145 W	104 W	MAX. SYS VOLT. 1000V	
Vpmax	17.9 V	16.1 V		
Ipmax	8.11 A	6.46 A		
Voc	22.3 V	—	MASS 12.5 kg	
Isc	8.78 A	—	APPLICATION CLASS A	

**TÜVRheinland**  
CERTIFIED

IEC 61215  
IEC 61730

www.tuv.com  
ID 0000023299

SERIES  
FUSE  
15 A

MAX.  
SERIES  
36 MODULES

Must comply with local safety standards prior to installation.

**KYOCERA**

Kyocera Solar Europe  
Kralovsky Vrch 1977.432 01  
Kadan, CZECH Republic

MADE IN EU

Figura II.0.3 – Informação técnica do PV

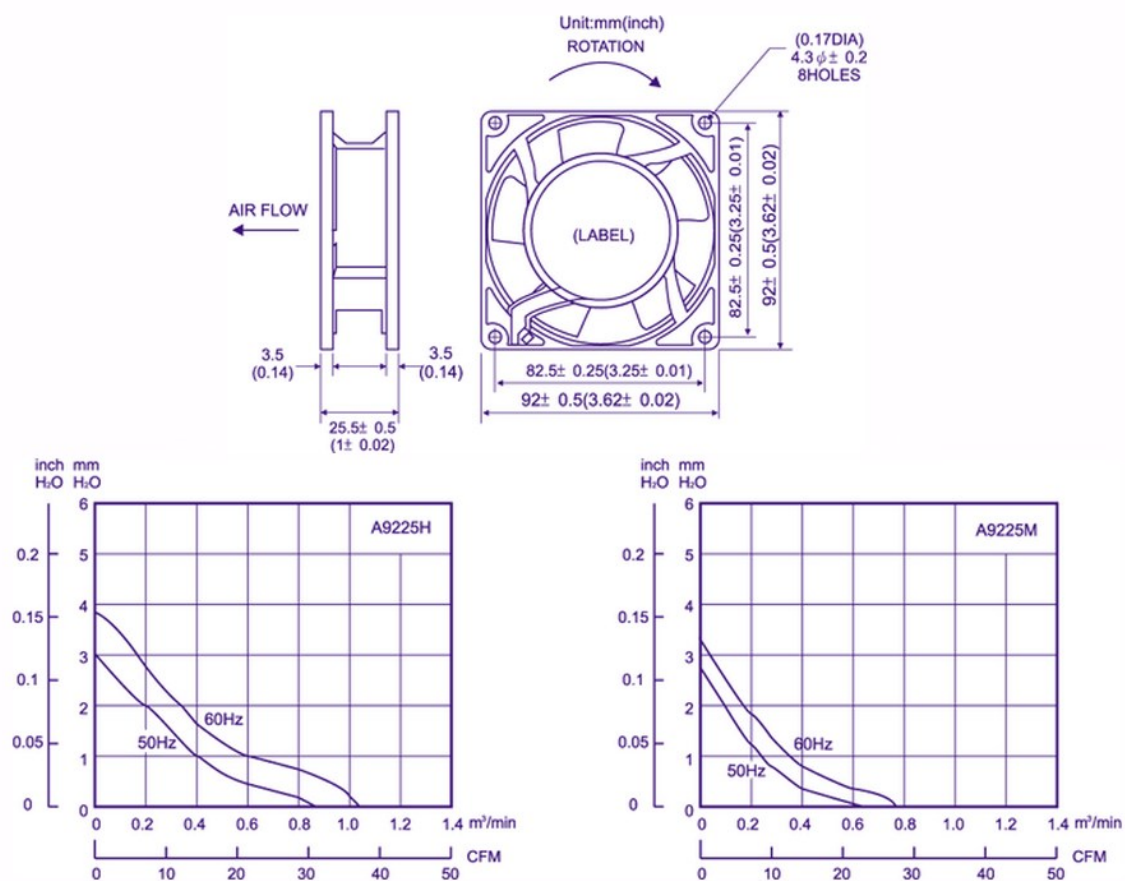


Figura II.0.4 – Informação técnica dos ventiladores